Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische Sensornachführung unter Anwendung nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung

Der Technischen Fakultät der

Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

D O K T O R - I N G E N I E U R

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Carl Alexander Schuler

Erlangen - 2012

Als Dissertation genehmigt von

der Technischen Fakultät der

Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 11.12.2012

Tag der Promotion: 15.04.2013

Dekanin: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Zusammenfassung

Die Messaufgaben heutiger dimensioneller Mikro- und Nanomesstechnik sind geprägt von zunehmend sinkenden Strukturgrößen und Bauteilabmessungen bei zugleich zunehmender Dreidimensionalität. Dies umfasst stark gekrümmte Oberflächen von Schneidkanten an Werkzeugen, optische Linsen und Mikrolinsenarrays oder auch funktionale Oberflächen. Bestehende Sensorik ist im erfassbaren Oberflächenwinkelbereich begrenzt, was zu steigender Messabweichung und nicht erfassten Punkten führt. Der bestehende Ansatz zur Steigerung des erfassbaren Winkels, eine Datenfusion aus mehreren Messungen mit unterschiedlichen Sensorneigungen, ist zeitaufwändig und bringt zusätzliche Unsicherheitsbeiträge. Andere Verfahren, wie die Dekonvolution sind in ihrer Effektivität begrenzt.

Die vorliegende Arbeit zeigt ein Verfahren zur Steigerung des erfassbaren Oberflächenwinkelbereichs und der Vermeidung der Nachteile bestehender Ansätze. Es basiert auf der Rotation eines Sensors um seinen Antastpunkt während der Messung. Durch Nachführung des Arbeitswinkels, abhängig von der lokalen Oberflächenneigung, wird der Sensor stets im optimalen Arbeitswinkel betrieben und winkelbedingte Messabweichung wird vermieden. Das Verfahren erhöht den effektiv erfassbaren Oberflächenwinkel und erlaubt 1D Sensoren für 3D Messungen zu nutzen. Die Sensornachführung wurde theoretisch in einer Simulationsumgebung und praktisch unter Anwendung eines Nanopositionier- und Nanomessgeräts realisiert und untersucht. Die Genauigkeit einer entwickelten Rotationskinematik wurde durch ein in-situ Kalibrierkonzept auf Basis eines Sensors mit elektrischer Nahfeldwechselwirkung gesteigert und die Wirksamkeit der Nachführung verifiziert.

Abstract

Today’s measurement tasks in dimensional micro and nano metrology can be characterized by decreasing structural sizes and absolute dimensions of workpieces with increasing three-dimensionality at the same time. This applies to highly curved surfaces like cutting edges of cutting tools, optical lenses and micro-lens arrays or also functional surfaces. Existing sensors cannot meet the increasing requirements due to a limited measurable surface angle, resulting in higher measurement deviation or erroneous points. The current approach to increase the detectable angle, a sensor data fusion of different measurements under different working angles, is time consuming and introduces additional contributions to measurement uncertainty. Other approaches like deconvolution have a limited effectiveness.

This work demonstrates a procedure to increase the detectable surface angle range while avoiding the disadvantages of existing approaches. It is based on the rotation of a sensor around its probing point during the measurement. By tracking the working angle depending on the local surface slope, the sensor stays in its optimal working angle and slope-dependent measurement deviation is avoided. The procedure increases the effectively detectable surface angle and allows the application of 1D sensors for 3D measurements. The sensor tracking was realized and investigated in theory with a simulation environment and practically under the application of a nanopositioning and nanomeasuring machine. The accuracy of a developed rotary kinematic was increased by applying an in-situ calibration principle based on a sensor with electrical near-field interaction and the effectiveness of sensor tracking was verified.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Inhaber des Lehrstuhls QFM, für die Möglichkeit, als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig zu werden, für das entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch, Inhaber des Instituts für Produktionsmesstechnik (IPROM) der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Unterstützung sowie die Übernahme des Korreferates.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch, Inhaber des Lehrstuhls für Sensorik (LSE) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg und zudem Entwickler der in dieser Arbeit genutzten Nanopositioniereinheit, für seine Unterstützung.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls QFM und des Lehrstuhls FMT – meinen Kollegen – danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die sehr konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere Dr.-Ing. Johannes Bernstein, Dr.-Ing. Philipp Krämer und Dipl.-Ing. Elmar Garcia. Besonders danke ich Dr.-Ing. Jörg Hoffmann für die Begeisterung der Nanomesstechnik, die er bei mir zu meinen Studienzeiten entfacht hat.

Die Zuarbeiten der von mir betreuten Studien- und Bachelorarbeiter leisteten einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Besonderer Dank obliegt in diesem Zusammenhang Romuald Jupiter Bakakeu Ngassam und Frederik Berger. Für Ihr herausragendes Engagement möchte ich ebenso den wissenschaftlichen Hilfskräften Johanna Witte, Fanuel Andemariam Mehari und Sebastian Büttner danken.

Meiner Familie und Freunden danke ich für Ihr Verständnis und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit. Besonders großer Dank gilt meinen Eltern, die mir ermöglichten, diesen Weg zu beschreiten.

Erlangen, Juni 2013 Carl Alexander Schuler

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AFM	Atomic force microscope
BNC	Steckverbinder “Bayonet Neill Concelman”
CAD	Computer-aided design
CSEM	Schweizer Zentrum für Elektronik und Mikrotechnologie
DSP	Digital signal processor (Digitaler Signalprozessor)
D-SUB	Steckverbinder „D-Subminiature“
FIBDW	Focused ion beam direct writing
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ISO	International Organisation for Standardisation
KMG	Koordinatenmessgerät
LIGA	Verfahrensschritte Lithographie, Galvanik und Abformung
MEMS	Micro-electro-mechanical systems
NMM-1	Nanopositionier- und Nanopositioniergerät NMM-1
NPL	National Physical Laboratory
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SMA	Steckverbinder “Sub-Miniature-A”
SMD	Surface-mounted device
STM	Scanning tunneling microscope (Rastertunnelmikroskop)
THT	Through hole technology
UPM	Ultraprecision machining
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

”There is Plenty of Room at the Bottom” - not just “There is Room at the Bottom.”

Zitat Richard P. Feynman über die Manipulation und Kontrolle auf einer kleinen Skala, Pasadena, 29.12.1959 [FEYNMANN 1959]

Dem Drang nach Fortschritt wurden in den letzten Jahrzehnten immer neue Türen aufgestoßen, zu Welten neuer technischer Möglichkeiten. Nicht nur, dass in einem top-down Ansatz eine kontinuierliche Miniaturisierung bestehender Technik möglich wurde, sondern auch, dass von einem bottom-up Ansatz Technik in komplett neue Dimensionen gebracht wurde. Insbesondere die Idee, eine Konstruktion direkt auf atomarer Ebene durchführen zu können, faszinierte Richard Feynmann [FEYNMANN 1959]. Beide Ansätze sind heute, 50 Jahre später, in der Mikro- und Nanotechnik vertreten.

Die Basis dieses Fortschritts wurde durch die Weiterentwicklung und Neuentwicklungen in der Fertigungstechnik gelegt. Hierzu gehören beispielsweise Fortschritte der spanenden Verfahren wie Fräsen und Bohren. Zunehmend miniaturisierte Werkzeuge und die Verfügbarkeit von mehrachsigen Fräszentren mit einer Fertigungsgenauigkeit im unteren Mikrometer- bis im Nanometerbereich erlauben immer kleinere und zugleich komplexere Strukturen [TANIGUCHI 1983]. Die resultierenden Techniken des UPM (Ultraprecision Machining) und Mikrozerspanung ermöglichen die Herstellung von Spritzgusswerkzeugen für Mikrolinsenarrays und Kunststoffkomponenten [BYRNE U.A. 2003]. Diese und andere Mikrokomponenten, wie Mikrofluidkanäle, zeichnen sich durch eine komplexe dreidimensionale Ausprägung bei Abmaßen im Mikrometerbereich aus. Die Optikfertigung mittels ultrapräzisen Diamantdrehens in Verbindung mit Fast-tool-servos erlaubt die kontrollierte Herstellung von Freiformflächen, wie Prismen, asphärische Linsen oder Spiegel und sogar deren Überlagerung mit Brechungsstrukturen im Mikrometerbereich [ZHANG U.A. 2012].

Neue Fertigungsverfahren andererseits erlauben auch eine direkte Fertigung von Mikrobauteilen und sogar Komponenten auf atomarer Ebene. Insbesondere sind hier Verfahren aus der Halbleitertechnik zu nennen mit lithographischen Methoden und Ätztechniken. Neben klassischer Lithographie sind die Verfahren des LIGA hier relevant, stehend für Lithographie, Galvanik und Abformung [BECKER 1986]. Anstatt einer Beschränkung auf Stoffe wie Silizium können so Strukturen aus Metallen und Kunststoffen hergestellt werden. Weitere direkt im Mikro- und Nanometerbereich arbeitende Verfahren sind strahlbasierte Fertigungsverfahren wie Laserbearbeitung oder im Nanometerbereich FIBDW (Focused Ion Beam Direct Writing) und gasphasenunterstützter Ionenstrahlabtrag und -auftrag [ALTING U.A. 2003], [FANG U.A. 2010]. Alle diese Verfahren erlauben die Herstellung von Mikrowerkstücken mit dreidimensional ausgeprägten Strukturen. Resultierende Produkte sind beispielsweise die Klasse der MEMS (micro-electro-mechanical systems), komplexe Mechaniken mit Gesamtabmessungen im Mikrometerbereich. Sie kommen heutzutage stark verbreitet in Sensoren für mechanische Größen vor, wie mehrachsige Beschleunigungssensoren für Crashsensoren oder Gyroskope [ALTING U.A. 2003], [HANSEN U.A. 2006].

Der Trend, immer kleinere Bauteile durch genauere Fertigungsverfahren bis hin zu direkt atomare Strukturen herstellen zu können, wurde schon 1983 von Taniguchi beschrieben [TANIGUCHI 1983]. Mit zukünftigen Verfahren der Fertigungstechnik wird immer mehr ”Room at the Bottom“ erschlossen werden können und die Strukturgrößen weiter gesenkt werden.

In der Summe ergeben sich mit den neuen Möglichkeiten Komponenten und Baugruppen, die entweder Abmessungen im Makrometerbereich haben und Strukturen bzw. Genauigkeiten im Mikro- bis Nanometerbeich aufweisen oder es ergeben sich Bauteile mit Gesamtabmessungen im Mikrometerbereich. Den Entwicklungen in der Fertigungstechnik steht zur Prüfung der hergestellten Bauteile immer ein Bedarf an Fortschritt in der Fertigungsmesstechnik entgegen. Schon 1968 stellte der Dresdner Professor Georg Berndt die Goldene Regel der Messtechnik auf [BERNDT U.A. 1968]. Nach dieser wird zur Prüfung eines geometrischen Merkmals mit einer vorgegebenen Toleranz eine um den Faktor 10 geringere Messunsicherheit benötigt, um das Toleranzfenster nicht durch die Messunsicherheit künstlich zu verkleinern. Um eine gewünschte Messunsicherheit zu erlangen, wird vom Messgerät zudem eine um den Faktor 10 kleinere Auflösung benötigt. Dieser empirischen Regel nach resultiert bei einer Toleranz von beispielsweise einem Mikrometer, was bei Mikrobauteilen schnell in dem Bereich der absoluten Abmessungen ist, eine benötigte Auflösung von 10 Nanometern. Im Mikro-/Nanobereich bleibt der verhältnismäßige Zusammenhang zwar nicht in den Größenordnungen des Makrobereichs erhalten, jedoch bleibt die Tendenz gültig.

Durch diese Anforderung wurde verstärkt in den letzten Jahren die Entwicklung der Mikro- und Nanomesstechnik vorangetrieben und bestehende Sensoren verbessert, sowie neue Systeme entwickelt. Insbesondere mit der Klasse der Nanokoordinatenmessgeräte fand hier eine wichtige Entwicklung statt [WECKENMANN U.A. 2009A]. Auf Seite der Sensoren sind an aktuellen Verfahren moderne taktile Profilometer zu nennen, aber auch optische Verfahren wie Weißlichtinterferometrie, konfokale Sensoren oder Fokusvariation. Eine andere Klasse resultiert aus dem bottom-up Ansatz mit den Rastersondenverfahren, die Wechselwirkungen auf atomarer Ebene als Messprinzip nutzen. Ein weiterer Trend ist zudem die Miniaturisierung von taktilen Sensoren, mikrotaktilen Systemen, die zu 3D Messungen fähig sind. Optische Systeme und Profilometer hingegen sind aufgrund der Strahlausbreitung bzw. aufgrund des Aufbaus auf 2D bis hin zu 2,5D limitiert. Von den mikrotaktilen Systemen abgesehen, sind alle Sensoren der dimensionellen Mikro- und Nanomesstechnik auf Werkstücke mit Oberflächen senkrecht zum Sensor angewiesen. Geneigte oder gekrümmte Flächen müssen unter einem systemspezifischen Akzeptanzwinkel des Sensors bleiben, in dem der Sensor aus der Oberflächennormale des Werkstücks geneigt sein darf. Abhängig vom Funktionsprinzip des Sensors resultiert ein Betrieb in der Nähe dieses Bereiches und darüber zu einer gesteigerten Messabweichung oder einer erhöhten Anzahl von Signalstörungen. Dies führt gerade bei Bauteilen mit hohen Aspektverhältnissen, starker Krümmung oder überlagerter Mikrostruktur zu Einschränkungen von Erfassbarkeit und erzielbarer Messunsicherheit, da der Akzeptanzwinkel an großen Teilen des Werkstücks nicht eingehalten werden kann. Die vorliegende Arbeit adressiert die Einschränkung des erfassbaren Winkelbereichs von Sensoren der Mikro- und Nanomesstechnik. Sie zeigt in Theorie und Praxis eine Möglichkeit auf, durch eine aktive Nachführung den nutzbaren Winkel für beliebige Sensoren zu erhöhen.

2 Stand der Technik

2.1 Stand der Technik in der Mikromesstechnik

Der Entwicklung in der Fertigungsmesstechnik und den damit möglich gewordenen Produkten steht die Entwicklung der Messtechnik gegenüber. Sie lässt sich sowohl auf Seiten der Sensorik betrachten, als auch bei den Koordinatenmessgeräten, die zum Betrieb der Sensoren genutzt werden. Als Sensoren kommen in der Mikromesstechnik sowohl taktile und optische Prinzipien, als auch die Klasse der Rastersondenverfahren zum Einsatz. Deren Funktion und Eigenschaften werden im Folgenden betrachtet.

2.1.1 Taktile Sensoren allgemein

Taktile Sensoren im Allgemeinen basieren auf der Erfassung einer Oberfläche durch mechanische Wechselwirkung zwischen einem geometrisch definierten Tastelement und der zu erfassenden Oberfläche. Dieses Prinzip kommt in unterschiedlicher Ausführung in Tastschnittgeräten und taktilen Tastsystemen zur Anwendung.

Klassische Tastsysteme, wie sie in Koordinatenmessgeräten zum Einsatz kommen, verwenden zur Antastung eine Kugel oder auch einen Zylinder [WECKENMANN U.A. 2004], [WECKENMANN 2012]. Beim Antastvorgang wird die Tastkugel ausgelenkt und die auftretende Kraft über einen Schaft durch Sensorik erfasst. Ein Federmechanismus oder eine Aktorik generiert eine reproduzierbare Antastkraft und Rückstellkraft. Durch Verwendung mehrerer Kraftsensoren kann neben dem Betrag der Kraft auch die Richtung im dreidimensionalen Raum erfasst werden. Die Relativbewegung zwischen dem Tastelement und einem Werkstück wird üblicherweise von einem Koordinatenmessgerät (KMG) realisiert. Der Mittelpunkt der Tastkugel ist hierbei im Bezug zum Gerätekoordinatensystem durch Einmessen bekannt. Die Bewegung von erstem mechanischem Kontakt bis zu dem Punkt, ab dem der konfigurierte Kraftwert erreicht wird, wird als Vorlauf bezeichnet. Nach Detektion des Kontakts wird die Bewegung abgebremst bis zum Stillstand – diese Distanz wird als Überlauf bezeichnet. Das Tastsystem wird zurückgezogen und die Oberfläche des Werkstücks wird in einzelnen Oberflächenpunkten erfasst. Im klassischen Fall erfolgt eine Einzelpunktantastung mit fester Antastkraft, jedoch ist auch ein scannender Betrieb mit variierender Antastkraft möglich. Die Verwendung von Tastsystemen wird in der Norm [DIN EN ISO 10360-5 2011] behandelt.

Zu berücksichtigen sind bei Tastsystemen die wirkenden Kräfte und mechanischen Spannungen durch die mechanische Antastwechselwirkung. Sie führen zu einer elastischen Deformation des Tasterschafts, des Antastelements und der Werkstückoberfläche und lassen sich nach der Hertz'schen Theorie beschreiben [HERTZ 1881]. Bei Annahme einer Tastkugel und einer ebenen Antastfläche führt die Antastkraft zu einer kreisförmigen Kontaktzone unter elastischer Deformation beider Partner, Bild 1. Im Material entsteht eine Spannungsverteilung mit dem Maximum im Zentrum. Die auftretende elastische Deformation der Tastkugel lässt sich nach Gleichung (1) beschreiben und die Biegung des Tasterschafts nach Gleichung (2). Mit Kenntnis der Materialpaarung Tastelement/Werkstück kann bei konstanter Tastkraft die Deformation berechnet, bzw. durch Einmessen ermittelt werden. Der resultierende effektive Radius des Tastelements wird vom KMG zur Berechnung des Oberflächenpunktes benötigt.

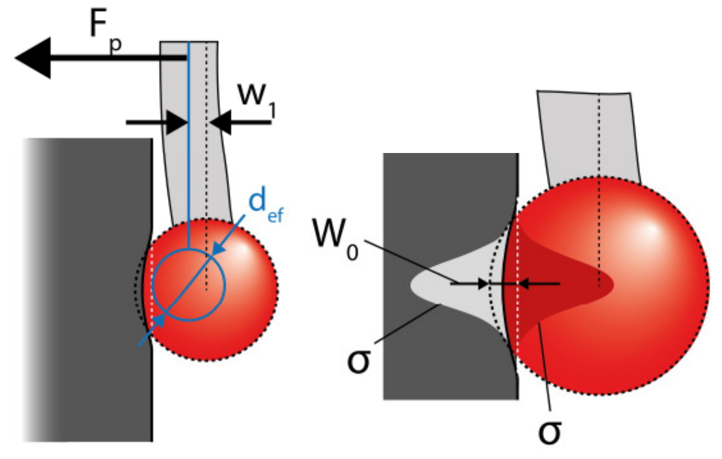


Bild 1: Spannungsverteilung, effektiver Tastkugeldurchmesser und Tasterschaftbiegung

F_p	Antastkraft
W_0	Elastische Deformation von Tastkugel und Werkstück
W_1	Elastische Deformation des Tasterschaftes
σ	Hertz'sche Pressung
d_{ef}	Effektiver Tastkugeldurchmesser
r	Tastkugelradius
υ	Querkontraktionszahl
E	Elastizitätsmodul
E*	Äquivalenter Elastizitätsmodul
Y	Streckgrenze
l	Tasterschaftlänge
d	Tasterschaftdurchmesser

$$w_0 = \sqrt[3]{\frac{2{,}25 \cdot \left(1-\upsilon^2\right)^2 \cdot F_p{}^2}{E^2 \cdot r}} \tag{1}$$

$$w_1 = \frac{64}{3 \cdot \pi} \frac{F_p \cdot l^3}{E \cdot d^4} \tag{2}$$

Zu beachten ist beim Betrieb die korrekte Dimensionierung der Antastkraft, da bei Überschreitung von materialspezifischen Grenzwerten eine plastische Deformation auftritt und Taster oder Werkstück beschädigt werden. Taktile Tastsysteme sind im Makrobereich seit längerer Zeit verfügbar und gut beherrscht sowie genormt [WECKENMANN 2012].

2.1.2 Mikrotaktile Systeme

Klassische taktile Systeme arbeiten üblicherweise mit Tastkugeldurchmessern zwischen 10 mm und 2 mm. Sie sind in dieser Form aufgrund ihrer Größe nicht in der Lage, die Merkmale von heutigen Mikrobauteilen zu erreichen. Eine Verkleinerung der Tastkugel ergab deshalb die Klasse der mikrotaktilen Sensoren. Eine lineare Miniaturisierung aller beteiligten Komponenten ist jedoch nicht möglich, da die zulässige Antastkraft überproportional fällt. Vor Darstellung möglicher Sensorentwürfe sollen die Einschränkungen im Mikrometerbereich erläutert werden. Das Hauptproblem folgt mit Reduktion des Tastkugeldurchmessers aus der Verkleinerung der Kontaktfläche. Bei gleichbleibender Antastkraft führt dies zur Überhöhung der Materialspannung. Nach Untersuchungen von Meli und Küng [MELI U. KÜNG 2007] muss eine Skalierung der Antastkraft nach (3) erfolgen, um die Materialgrenzwerte einzuhalten:

$$F_p \cong 21 \cdot \frac{Y^3}{E^{*2}} \cdot r^2 \tag{3}$$

So zieht beispielsweise eine Halbierung des Kugeldurchmessers demnach eine Viertelung der zulässigen Antastkraft nach sich. Für die zuverlässige Nutzung einer gesenkten Antastkraft werden neuartige Kraft- und Auslenkungssensoren benötigt, die im Gegensatz zu Millinewton bei bestehenden Systemen mit Mikronewton arbeiten können.

Die nächste Einschränkung ergibt sich aus dynamischen Kräften, zusätzlich zur betrachteten statischen Antastkraft. Beim Antastvorgang wird beim ersten Oberflächenkontakt die kinetische Energie aller bewegter Sensorkomponenten abgebaut, bzw. auf das Werkstück übertragen. Maßgeblich trägt hier neben dem Schaft die Tastkugel bei. Meli und Küng überschlagen zudem den Zusammenhang von zulässiger Masse und Radius nach (4):

$$m = 106 \cdot \frac{Y^5}{v^2 \cdot E*^4} \cdot r^3 \quad (4)$$

Beispielweise erfordert bei einer Geschwindigkeit von 1 mm/s eine Kugeldurchmesserreduktion von 4 mm auf 0,1 mm eine Reduktion der zulässigen bewegten Masse von 360 g auf 28 mg [MELI U. KÜNG 2007]. Dieser Anforderung wird durch kürzere und leichtere Schäfte entgegengekommen, allerdings unter Berücksichtigung der Durchbiegung. Nach (2) führt eine Durchmesserreduktion zu einer deutlichen Steigerung der Durchbiegung. Außerdem fördert die Verjüngung des Schaftes eine Anisotropie des Auslenkungsverhaltens, da sich der Schaft in Längsrichtung steifer bei der Antastung verhält.

Neben mechanischen Einschränkungen gewinnt bei einer Miniaturisierung taktiler Systeme auch die Formabweichung des Tasters an Einfluss. Während der Messung erfolgt eine Überlagerung der Tastelementform mit der zu erfassenden Oberfläche, auch als morphologische Filterung bezeichnet [KRYSTEK 2009]. Die Filterung glättet durch die Messung hochfrequente Oberflächenanteile wie Rauheit sowie kleine Strukturen und wird stärker bei größeren Tastkugeln, Bild 2. Eine möglichst kleine Tastkugel ist deshalb wünschenswert.

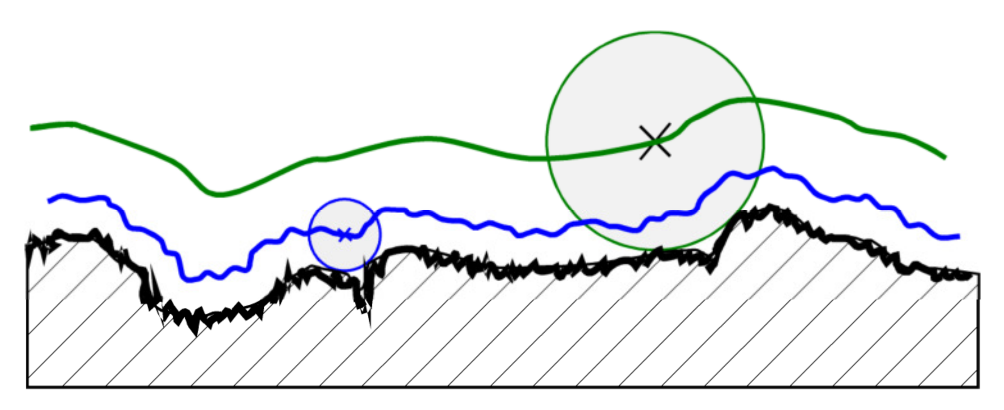


Bild 2: Morphologische Filterung: Tastelementbahn bei unterschiedlichen Durchmessern

Das bisherige Modell für die Oberflächenrekonstruktion geht von einer idealen Tastkugel mit vernachlässigbarer Formabweichung aus, so dass ein Oberflächenpunkt über Kraftrichtung und den konstanten Durchmesser bestimmt werden kann. Mit zunehmender Miniaturisierung ist dies jedoch nicht mehr komplett gültig und die Form der Antastkugel überlagert die Werkstückform ungleichmäßig, Bild 3. Bei der Messung (a) schwankt der Abstand von Tastermitte zu Werkstück und der Kontaktpunkt ist auch nicht senkrecht zur Bewegungsbahn. Beides wird bei der Rekonstruktion (b) nicht berücksichtigt und die resultierende Kontur ist von der Tasterform überlagert und kann durch Annahme einer senkrechten Antastung zu Sprüngen bzw. Unstetigkeiten führen. Eine kleinere Kugel mit höherer relativer Formabweichung verstärkt diesen Effekt. Beispielsweise sind Präzisionskugeln aus Saphir nur bis zu einem Durchmesser von 125 µm erhältlich, kleinere Kugeln können momentan aus Metall mittels Funkenerosion oder Aufschmelzen in Metalltropfen hergestellt werden. Es sind bis zu 50 µm möglich, bei jedoch steigender Formabweichung [RIEL U. BOS 2011].

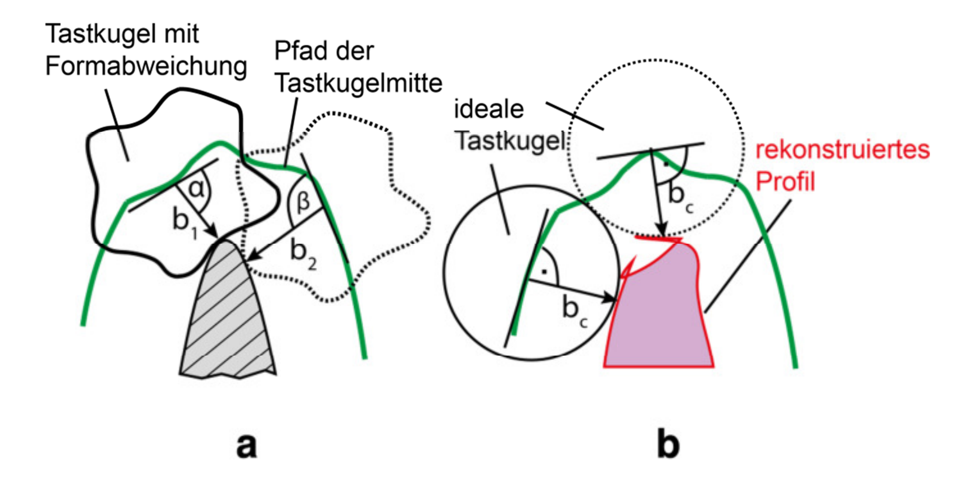


Bild 3: Auswirkung einer Tastkugel mit Formabweichung (b_1, b_2: tatsächlicher Antastvektor, b_c für die Rekonstruktion verwendeter Antastvektor

Weitere Einschränkungen kommen bei mikrotaktilen Systemen durch den größeren Einfluss von Oberflächenkräften hinzu [Bos u.a. 2009], [Bos 2010], [Van Brussel u.a. 2000], [Claverley u. Leach 2010]. Diese konnten im makroskopischen Bereich weitestgehend ignoriert werden, sind in der Mikromesstechnik jedoch von Bedeutung. Zu nennen sind hier Van-der-Waals Kräfte, hydrostatische Kräfte, elektrostatische Kräfte oder auch Gravitation. Bei Annäherung der Tastkugel an die Oberfläche führen sie zu einer starken Anziehung und die Tastkugel wird bei einem Snap-in auf das Werkstück hinzu beschleunigt. Beim Rückzug bleibt die Tastkugel im ersten Moment kleben, unterstützt durch Mikroverhakungen und hydrostatische Kräfte. Erst bei mit steigender Rückzugskraft löst sich die Kugel spontan von der Oberfläche unter einem Snap-out. Da der Snap-in im Abstand von Nanometern erfolgt, jedoch der Snap-out Mikrometer erreichen kann, ist der Antastvorgang mit einer deutlichen Hysterese verbunden. Diesem kann durch steifere Tasterschäfte entgegengewirkt werden. Bei einem scannenden Betrieb wirken sich diese Kräfte abhängig von der Materialpaarung in einem Stick-Slip Effekt aus, einer ruckartigen Abfolge von Haften und Gleiten.

Um diesen Einschränkungen zu begegnen wurden weltweit mehrere Ansätze verfolgt, mikrotaktile Systeme zu realisieren. Das Hauptziel ist jeweils mit geringeren Antastkräften arbeiten zu können und die bewegte Masse zu reduzieren. Es sollen unterschiedliche Varianten aufgezeigt werden, ausgehend von aktueller Normung. In der Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 12.1 „Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Annahme- und Bestätigungsprüfungen für Koordinatenmessgeräte zum taktilen Messen von Mikrogeometrien“ sind vier wichtige Ansätze erfasst [VDI/VDE 2617 Blatt 12.1 2011]. Eine Übersicht weiterer Systeme wurde in [Weckenmann u.a. 2004], [Weckenmann u.a. 2009a], [Weckenmann u. Schuler 2011] veröffentlicht.

Induktiver Taster mit Festkörpergelenken

Einer der in VDI 2617 genannten Ansätze erfolgte am Institut METAS in Zusammenarbeit mit Mecartex, [Küng u.a. 2007]. Der Federmechanismus für die Tastkraft wurde bei diesem Design über eine komplexe monolithische Mechanik aus Festkörpergelenken realisiert. Der Aufbau sperrt rotatorische Freiheitsgrade und separiert eine Auslenkung in ihre translatorischen Einzelkomponenten, jeweils detektiert von induktiven Sensoren. Durch eine 45° Neigung sind alle Achsen gleichmäßig von Schwerkraft beeinflusst, zudem ist der Aufbau darauf ausgelegt, isotropes Verhalten zu zeigen. Das System resultiert in einer Steifigkeit von

20 mN/mm bei einer bewegten Masse von 7 g. Als Messbereich werden ± 200 µm angegeben mit einer Wiederholgenauigkeit von 5 nm, Bild 4.

Piezoresistiver Taster

Ein weiterer in der Richtlinie enthaltener Taster wurde an der TU Braunschweig entwickelt und monolothisch mittels Verfahren der Halbleitertechnik hergestellt [BÜTEFISCH U. BÜTTGENBACH 1999]. Aus Silizium wird durch anisotropes Ätzen eine Membran mit einer Verdickung in der Mitte hergestellt. Auf dem Mittelstück wird ein Taststift aufgeklebt, an dessen Ende eine Saphirkugel mit 0,3 mm Durchmesser sitzt. Eine Auslenkung führt zu einer Deformation der Membran, die von implantierten piezoresistiven Elementen detektiert wird. Das System zeichnet sich mit 800 N/m lateral und 20 kN/m in Schaftrichtung durch eine hohe Steifigkeit aus [BÜTTGENBACH U.A. 2006]. Die maximal wirkende Antastkraft wurde bei [DAI U.A. 2009] unter Verwendung eines Mikrokraftnormals zu 0,73 mN bestimmt und die minimal detektierbare zu 9 µN [TIBREWALA U.A. 2009]. Eine 1D-Antastunsicherheit von 10 nm in X/Y und 20 nm in Z werden angegeben [BÜTTGENBACH U.A. 2006]. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich mit der Optimierung der Tastermembran [TIBREWALA U.A. 2009] und der parallelisierten Anwendung von Tastern zur gleichzeitigen Messung von Nutzen [SCHRADER U.A. 2010], [SCHRADER U.A. 2011], [SCHRADER U. TUTSCH 2012], Bild 4.

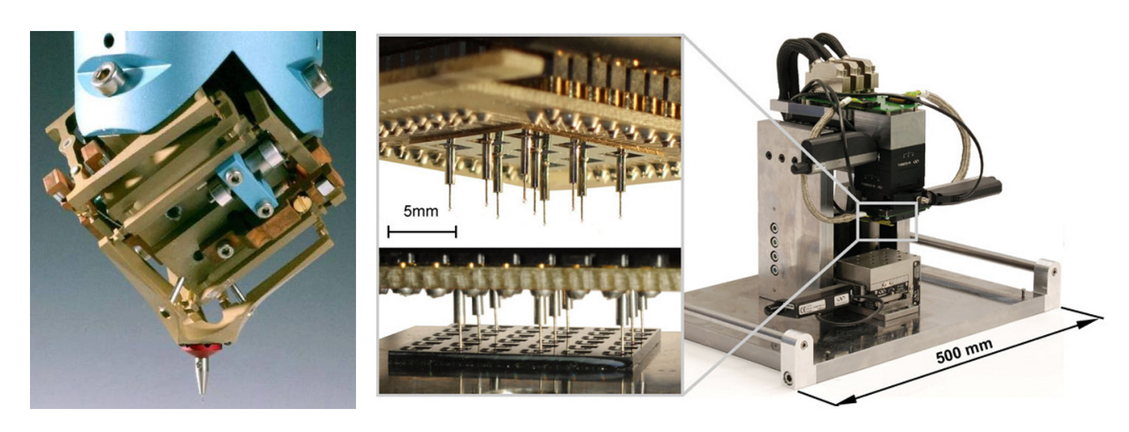


Bild 4: Mikrotaktile Systeme: Links: Tastsystem METAS [KÜNG U.A. 2007], Rechts: Parallelisiertes System [SCHRADER U. TUTSCH 2012]

Optotaktile Systeme

Bisher beschriebene Systeme basieren auf der Erfassung einer über den Schaft übertragenen Kraft. Zur Umgehung der direkten Kraftdetektion und Senkung der notwendigen Antastkraft wurden Ansätze wie optotaktile Systeme entwickelt, ebenfalls in der VDI 2617 behandelt. Hier ist der 2D-Faseraster zu nennen, der bei der PTB entwickelt wurde und mittlerweile bei Werth Messtechnik erhältlich ist [GUIJUN U.A. 1998], [SCHWENKE U.A. 2001]. Eine hochflexible Glasfaser mit einer Glaskugel am Ende wird in den Strahlengang eines Messmikroskops gebracht. Laut Hersteller sind Kugeldurchmesser bis hinunter zu 10 µm möglich. Bei seitlicher Antastung mit der Kugel wird direkt die Auslenkung der Kugel im Videosystem sichtbar, zudem kann für Sacklöcher die Kugel beleuchtet werden. Durch die optische Erfassung ergeben sich Antastkräfte im Bereich von 1 µN bis 100 µN. Dieser Aufbau erlaubt jedoch keine Auslenkung in Faserrichtung und ist durch die geringe Steifigkeit gegenüber Oberflächenkräften und Vibrationen erhöht empfindlich. Es wurden mehrere Ansätze zur Realisierung einer dreidimensionalen Antastung untersucht. Zuletzt wurde in der Faser eine zweite Kugel eingebaut, die bei Beleuchtung mit Laserlicht ein Specklemuster liefert, wel-

ches sich charakteristisch bei Auslenkung in Längsrichtung verändert [NEUSCHAEFER-RUBE U. WISSMANN 2007], [TUTSCH U.A. 2010], Bild 5. Die Lösung, die sich durchgesetzt hat und nun als Werth Fasertaster 3D erhältlich ist, hängt die Glasfaser nun an drei Federn auf und erfasst die Längsauslenkung mit einem von hinten angeschlossenen Foucault Lasersystem [PETZ U.A. 2012]. Optotaktile Systeme wurden mittlerweile auch bei anderen Instituten entwickelt [MURALIKRISHNAN U.A. 2005], [CUI U.A. 2012].

Vibrationsbasierte Antastung

Ein weiteres Verfahren zur Vermeidung von Antastkraft, ebenfalls in der Richtlinie VDI/VDE 2617 genannt, besteht in der mechanischen Dämpfung einer Schwingung, Bild 5. Hierbei wird üblicherweise mit einem Piezoaktor eine Tastkugel an einem Schaft in Schwingung versetzt. Bei Annäherung an eine Oberfläche dämpft der kurzzeitige mechanische Kontakt die Schwingungsamplitude. Eine 3D-Antastung ist möglich, da auch eine seitliche Antastung durch Reibung zu einer Dämpfung führt, jedoch kann üblicherweise der Antastvektor nicht allein aus dem Sensor bestimmt werden und muss indirekt über die Bewegungsrichtung des Sensors erfasst werden. Durch die Vibration des Sensors ergibt sich eine stärkere Filterung von Oberflächenstrukturen sowie eine höhere Unsicherheit gegenüber stehenden Tastern. Von Vorteil ist jedoch, dass kleine Tastkugeln, zum Beispiel 30 µm Glas wie beim Mitutoyo UMAP System, genutzt werden können [HIDAKA 2006]. Die Weiterentwicklung ist bei [HIDAKA U.A. 2010] beschrieben. Weitere Designs wurden von Masazuwa [MASUZAWA U.A. 1993] und Lebrasseaur [LEBRASSEAUR U.A. 2001] realisiert.

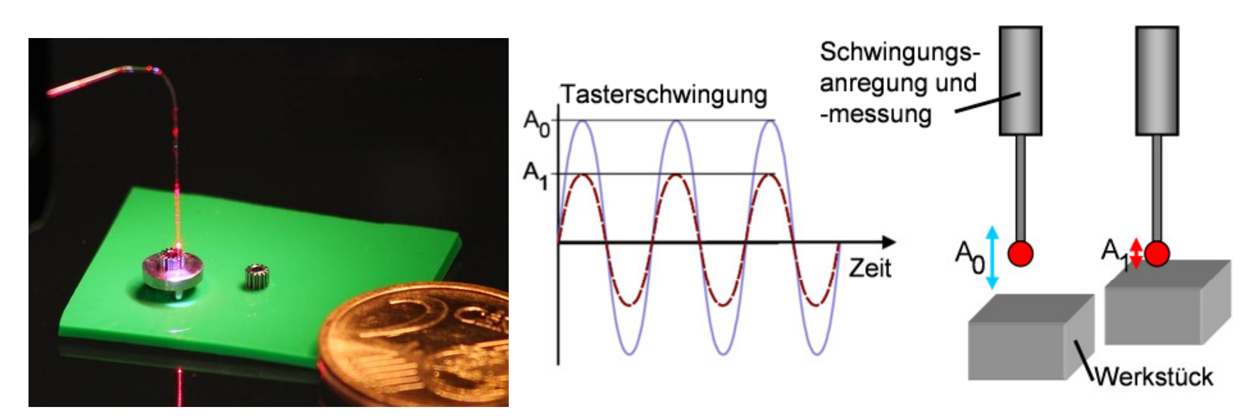


Bild 5: Mikrotaktile Systeme: Links: Optotaktiler 3D-Fasertaster mit Speckleprinzip, Rechts: Vibrationsprinzip

Triskelion

Ein anderes mikrotaktiles System wurde 1999 am National Physics Laboratory (NPL) entwickelt, [PEGGS U.A. 1999]. Ein Taststift mit einer 1 mm oder 0,3 mm Tastkugel ist zentral an einer Scheibe angebracht, aus der in gleichmäßigen Abständen Wolframkarbidstäbe seitlich weggehen und an deren Enden polierte Aluminiumscheiben sind. Letztere sind die Gegenstücke von kapazitiven Sensoren, die bei Auslenkung des Tasters eine Abstandsänderung erfahren. Als Federelemente zur Rückstellung und Aufbringung der Tastkraft werden die drei Scheiben von je einer 50 µm dünnen Kupferberyllium Blattfeder gehalten. Die resultierende bewegte Masse liegt bei 350 mg, die maximale Auslenkung bei 20 µm. Das System wurde zur kommerziellen Reife gebracht und wurde als Weiterentwicklung unter dem Namen Triskelion auf den Markt gebracht [IBS 2012], [SPAAN U. WIDDERSHOVEN 2011]. In der Überarbeitung wurden Blattfeder und Stab durch einen monolithischen Invaraufbau ersetzt. Die be-

wegte Masse wurde dadurch auf 160 mg reduziert. Als technische Daten wird eine Auslenkung bis zu 10 µm angegeben mit einer Auflösung von 3 nm und nutzbaren Tastkugeln von 160 µm bis 500 µm. Eine Aktualisierung der Konstruktion seitens des NPL wird in [CLAVERLEY U. LEACH 2010] beschrieben, bei der piezoresistive Sensoren zum Einsatz kommen und eine Vibration überlagern können. Dies dient der Reduktion von Oberflächenkräften sowie der Kontaktdetektion.

Die mikrotaktilen Systeme stellen in der Mikromesstechnik eines der neuesten Verfahren dar und werden mit weiterer Entwicklung an Einfluss gewinnen, da sie momentan die einzigen echten 3D-Verfahren in der Mikromesstechnik sind. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Anzahl der kommerziell erhältlichen Systeme sehr stark beschränkt und die Systeme sind sehr empfindlich gegenüber Beschädigung bei gleichzeitig hohen Ersatzteilkosten. Sie kommen zum Teil auch schon bei der Messung der in Kapitel 2.2 gezeigten Bauteile zum Einsatz. Das Hauptproblem mikrotaktiler Systeme ist momentan die Begrenzung des Tastelementdurchmessers, der die erfassbare laterale Auflösung bestimmt. Die verfügbaren Systeme verwenden Tastkugeln bis zu 160 µm Durchmesser, wie im Fall des Triskelion Systems. Geringere Durchmesser, wie die gezeigten Glaskugeln, sind nur mit Sonderverfahren möglich, die jedoch eine geringere Auflösung als die kraftbasierten Systeme aufweisen.

2.1.3 Tastschnittgeräte, Profilometer

Eine relevante Klasse von Geräten der Mikromesstechnik bilden Tastschnittgeräte oder auch Profilometer. Nach [DIN EN ISO 3274 1997] ist ein Tastschnittgerät definiert als „Meßgerät, das Oberflächen mit einer Tastspitze ertastet, Abweichungen in Form des Oberflächenprofils erfasst, Kenngrößen berechnet und Profile aufzeichnen kann."

Im Gegensatz zu taktilen Sensoren für Koordinatenmessgeräte werden üblicherweise keine vollen Kugeln zur Antastung verwendet, sondern konisch zulaufende Tastspitzen, deren Ende in einer geometrisch definierten Verrundung endet. Der eigentliche Kontakt mit dem Werkstück erfolgt an der sphärischen Front mit genormten Radien von 10 bis 2 µm, [DIN EN ISO 3274 1997]. Aus mechanischen Stabilitätsgründen kann der Öffnungswinkel der Spitze nicht beliebig klein gewählt werden, um Deformation und Bruch zu vermeiden. In der Norm wird als Winkel 90° oder 60° festgelegt. Im Gegensatz zu mikrotaktilen Systemen ist durch die kleineren Radien eine höhere Auflösung in Scanrichtung möglich, jedoch gelten alle physikalischen Grenzen, insbesondere die Gefahr der Oberflächenbeschädigung genauso.

Ein typischer Aufbau eines Tastschnittgerätes wird in [DIN EN ISO 25178-601 2011] skizziert, Bild 6 links. Die Tastspitze ist an einem Ausleger installiert, der drehbar gelagert ist. Nachdem die Spitze in mechanischen Kontakt mit der Oberfläche gebracht wurde, wird sie von einem Vorschubgerät über die Oberfläche gezogen und die Auslenkung der Spitze aufgezeichnet. Die Auslenkung kann über die Drehung des Armes induktiv oder mit einem Phasen-Gitter-Interferometer, wie z.B. beim Taylor Hobson Form TalySurf PGI erfasst werden. Das Modell Serie 2 hat eine vertikale Auflösung von 12,8 nm, Bild 7, neuere Geräte haben bis zu 0,8 nm [TAYLOR HOBSON 2012].

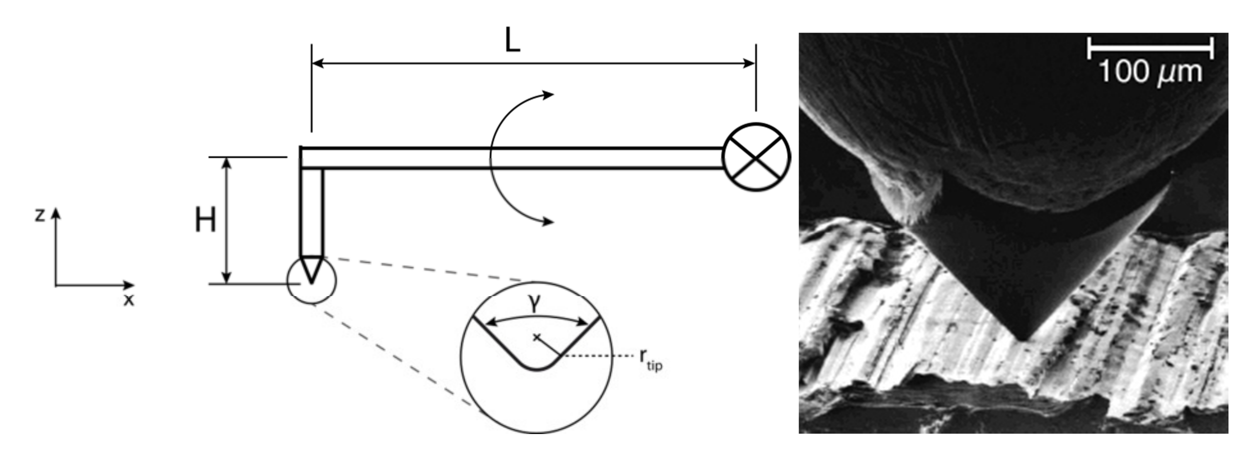


Bild 6: Links: Schematischer Aufbau eines Tastschnittgeräts nach Norm ISO 25178-601 (L: Länge des Tastarms um Drehgelenk, H: Tasterhöhe, γ: Kegelwinkel, r_{tip}: Spitzenradius). Rechts: Nahaufnahme der Kontaktzone [PTB 2012]

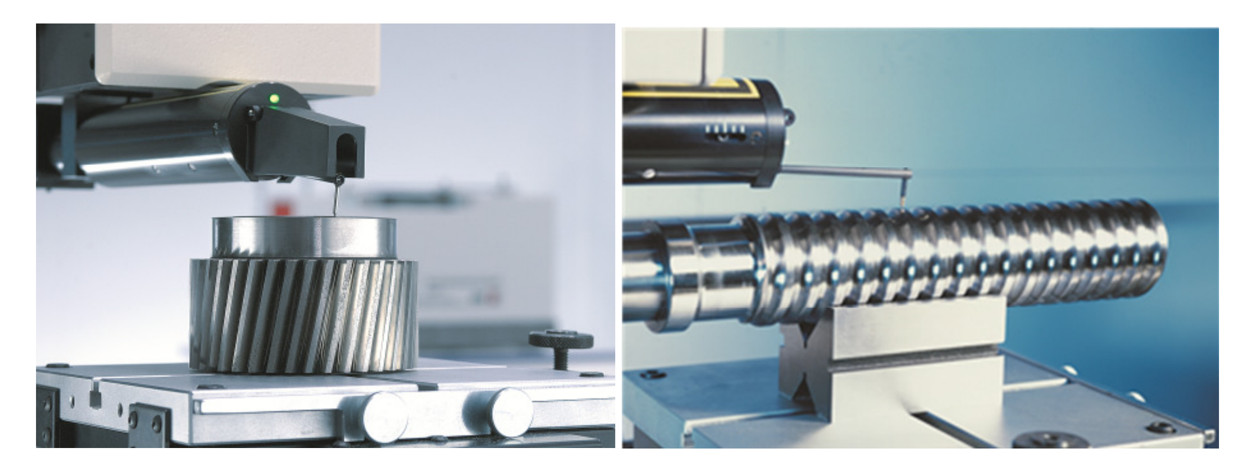


Bild 7: Tastschnittgerät Taylor Hobson Form TalySurf, Messung von Rauheit und Form

Tastschnittgeräte finden Anwendung in der Formprüfung von Oberflächen, beispielsweise Linsen, und bei der Ermittlung von Oberflächenkenngrößen wie Rauheit oder Welligkeit nach [DIN EN ISO 4287 2012], [DIN EN ISO 13565-1 1998] und [STOUT 1993]. Für letztere Aufgaben sind mikrotaktile Systeme aufgrund ihrer Tastelementgrößen nur eingeschränkt geeignet. Zu berücksichtigender Aspekt, insbesondere gegenüber mikrotaktilen Systemen ist die Eindimensionalität der Richtungserfassung. Im Gegensatz zu den dreidimensionalen Kraftsensoren von Tastsystemen kann die Auslenkung nur in einer Richtung erfasst werden. In Verbindung mit einem Vorschubgerät zum Scanning ergibt sich somit nur ein 2,5D-System.

Aufgrund dieser Tatsache wird ein fester Referenzantastpunkt an der Front der Krümmung angenommen und eine seitliche Antastung kann nicht von einer regulären unterschieden werden, Bild 8. Ein Verlassen des Referenzpunktes führt daher zu einer Abweichung von der tatsächlichen Oberfläche, die bei einem Kontakt im sphärischen Bereich nach (5) berechnet werden kann. Bei starker seitlicher Antastung unter Verlassen der sphärischen Front nimmt die Abweichung zudem stark zu. Auf diese morphologische Filterung wird in [DIN EN ISO 25178-601 2011] hingewiesen. Gerade bei hohen Aspektverhältnissen und einem Flankenkontakt steigen die auf Werkstück und Spitze wirkenden Kräfte stark an und die Gefahr der Beschädigung steigt.

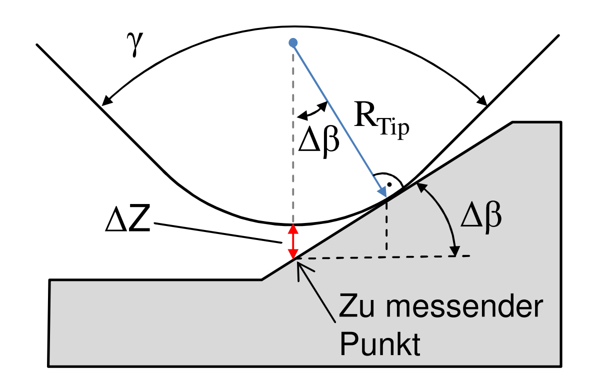


Bild 8: Messabweichung durch steile Oberflächenwinkel

$$\Delta Z = R_{Tip}(\sin(\Delta\beta)\cdot\tan(\Delta\beta)+\cos(\Delta\beta)-1) \tag{5}$$

Zusätzlich zur Oberflächenneigung muss die Auslenkung nach oben berücksichtigt werden, da mit Auslenkung der Spitze ein lateraler Versatz einhergeht. Dieser wird über eine Bogenkorrektur kompensiert.

Diese Effekte sind bei der Auswahl eines Tastschnittgerätes für eine Messaufgabe zu berücksichtigen und schränken den Anwendungsbereich, insbesondere den zulässigen Oberflächenwinkelbereich ein.

2.1.4 Optische Messverfahren

Neben taktilen Messprinzipien kommen heutzutage in der Mikromesstechnik sehr oft optische Verfahren zum Einsatz. Durch die kontaktfreie Antastwechselwirkung mittels Licht ist eine Beschädigung des Werkstücks ausgeschlossen und üblicherweise sind deutlich höhere Messgeschwindigkeiten möglich. Optische Systeme lassen sich unterteilen in punktförmig arbeitende 1D Sensoren sowie flächig arbeitende 2,5D Sensoren. Allen Systemen gemein ist eine hohe Auflösung in Strahlausbreitungsrichtung bis hin zu Sub-nm, abhängig vom Funktionsprinzip. Die laterale Auflösung ist üblicherweise jedoch um mehrere Potenzen schlechter, begrenzt von der Wellenlänge des verwendeten Lichts λ. Nach dem Rayleigh- Kriterium ergibt sie sich zu 0,61*λ/NA, Gleichung (6) [WECKENMANN 2012].

Optische Sensoren weisen prinzipbedingte Einschränkungen auf. Eine generelle Einsatzgrenze optischer Sensoren resultiert durch deren erfassbaren Oberflächenwinkel. Der erfassbare Grenzwinkel zur optischen Achse ist der Winkel, unter dem das von der Oberfläche reflektierte Licht noch in das Objektiv zurück reflektiert wird, Bild 9, [SEEWIG 2009]. Dieser Winkel kann in der Praxis für gerichtet reflektierende Oberflächen aus der Kenngröße eines Objektivs, der numerischen Apertur NA bestimmt werden, sowie dem Brechungsindex n des umgebenden Mediums. Die numerische Apertur wiederum wurde aus diesen beiden Größen berechnet, Gleichung (6). In der dimensionellen Messtechnik ist das Umgebungsmedium üblicherweise Luft, mit einem Brechungsindex von n = 1.

$$NA = n\cdot\sin(\alpha) \tag{6}$$

α = Halbbreite des Strahlkegelwinkels
n = Brechungsindex

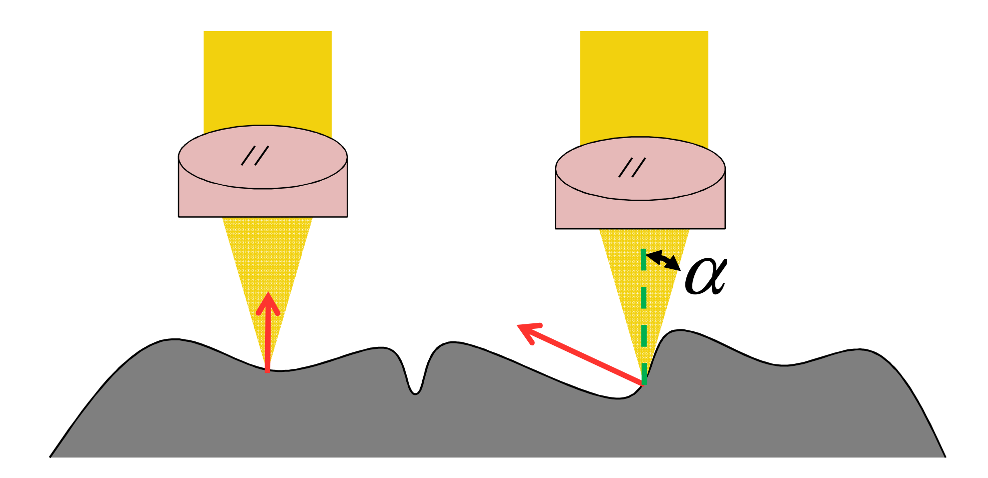


Bild 9: Erfassbarer Oberflächenwinkel: Winkel der Reflexion in Abhängigkeit der lokalen Steigung

Ein üblicher Wert der numerischen Apertur in der Praxis ist für ein 50x Objektiv 0,55 [GAO U.A. 2008]. Mit steigender NA sinkt der Arbeitsabstand zum Werkstück und eine eventuelle Kollision muss bei Werkstücken mit hohen Aspektverhältnissen berücksichtigt werden. Ob ein Werkstück mit einem bestimmten Oberflächenwinkel unterhalb des Grenzwinkels oder mit einer bestimmten Struktur erfasst werden kann, hängt neben der Auflösung des Messgeräts noch von weiteren Faktoren ab, wie den optischen Eigenschaften des Werkstücks. Abhängig vom Material des Werkstücks und der Oberflächenrauheit sind hier Transparenz und diffuse oder gerichtete Reflexion zu nennen. Verfahren wie z.B. die Fokusvariation[1] benötigen raue Oberflächen mit diffuser Reflexion, interferometrische Systeme hingegen glatte, spiegelnde Oberflächen. Zusätzlich können optische Wechselwirkungen eine Punkterfassung beeinträchtigen oder komplett verhindern. Insbesondere soll hier die Störung an Kanten genannt werden, auch als Batwings bezeichnet, nach ihrer Form, [SEEWIG 2009], [LIPSON U.A. 1997]. Ein Teil des Lichts aus dem Sensor wird von der Oberseite der Kante und ein Teil von der Unterseite reflektiert. Beide Anteile überlagern sich und führen an der Kante zu einer starken Abweichung der gemessenen Höhe. Nicht nur die Kante selbst, sondern auch die Nähe der Kante ist von diesem Effekt betroffen. Er ist insbesondere bei interferometrischen Verfahren zu beobachten, jedoch nicht auf diese beschränkt [GAO U.A. 2008], [HOFFMANN 2009], [MANSKE U.A. 2008].

im Folgenden sollen für die Mikromesstechnik relevante optische Verfahren und deren Eigenschaften kurz aufgelistet werden. Eine Übersicht und Bewertung findet sich unter anderen bei [HANSEN U.A. 2006], [SCHREVE 2010], [SEEWIG 2009], [LONARDO U.A. 1996], [WECKENMANN 2012].

Fokusverfahren

Das Fokusverfahren basiert auf der Projektion eines Lichtpunkts auf die Oberfläche. Über die Auswertung dessen Reflexion zurück in den Strahlengang kann bestimmt werden, ob der Oberflächenpunkt im Fokus liegt oder nicht. Bei einem Autofokussystem wird der optische Fokus in Strahlrichtung über eine Aktorik verschoben und die Oberflächenhöhe bestimmt, die mit dem Fokusabstand übereinstimmt. Eine Variation ist das Fixfokussystem, bei dem das Werkstück bewegt wird. Technisch kann der Grad der Fokussierung über eine foucaultsche Schneide oder eine astigmatische Linse in Verbindung mit einer Mehrquadrantendiode realisiert werden. [HOFFMANN U. WECKENMANN 2005], [WECKENMANN 2012]. Eine flächenhafte

[1] Die Beschreibung des Verfahrens der Fokusvariation erfolgt auf Seite 14, je nach Hersteller werden auch andere Bezeichnungen für das Verfahren verwendet.

Oberflächenerfassung wird durch Abrastern realisiert. Praktisch erfassbare Winkel liegen im Bereich ± 15° [HANSEN U.A. 2006].

Weißlichtinterferometrie

Weißlichtinterferometer arbeiten flächig und bringen die Reflexion von der Oberfläche mit der Reflexion aus einem Referenzstrahlengang zur Interferenz. Über Interferenzstreifen kann im resultierenden Bild, das von einem CCD-Sensor aufgenommen wird, der Oberflächenunterschied zum Referenzstrahlengang bestimmt werden. Für eine eindeutige Auswertung der Interferenzstreifen muss der ausgewertete Höhenbereich begrenzt werden auf etwa 3 µm, üblicherweise durch die geringe Kohärenzlänge des verwendeten weißen Lichts. Reflexionen außerhalb dieses Bereiches führen zu keiner Interferenz. Durch Bewegung des Sensors auf die Oberfläche zu, wird die Höheninformation des Werkstücks erfasst. Der erfassbare Winkelbereich wird mit ± 30° angegeben, jedoch zeigen Praxisberichte, dass abhängig von der Oberflächenkrümmung die Grenze viel früher erreicht wird [Gao u.a. 2008]. Neben den erwähnten Batwings wird hier insbesondere die Krümmung der Oberfläche als Ursache genannt. Eine starke Krümmung führt, abhängig vom Gerät, bei der Auswertung zu sprungartigen Abweichungen, bei der die Oberflächenhöhe im Interferenzbild um die Hälfte der Wellenlänge abweichend zugeordnet wird. Für eine sinusförmige Oberfläche der Periodenlänge 25 µm, der Amplitude 1,36 µm und dem maximalen Winkel von 37° wurde bei [Gao u.a. 2008] bei mehreren kommerziell erhältlichen Weißlichtinterferometern der erfassbare Winkelbereich mit ± 22° oder schlechter angegeben. Die Einschränkungen durch die Oberflächenkrümmung wurde auch bei [HOFFMANN 2009] an einer Mikrokugel gezeigt, Bild 10.

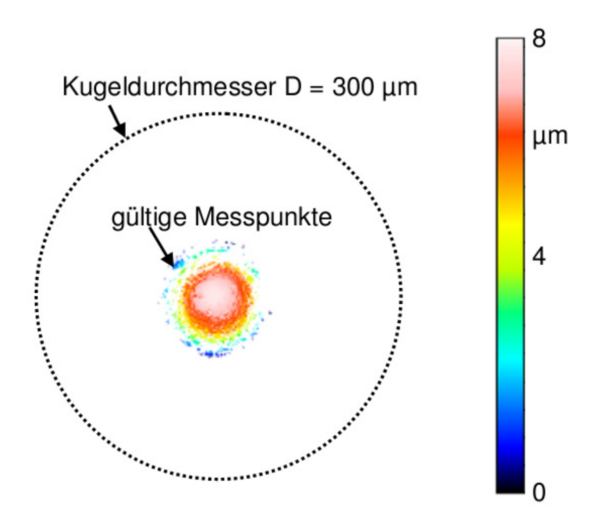


Bild 10: Messung einer Hartmetallkugel (D=0,3 mm) mittels Weißlichtinterferometrie (Mirauobjektiv, 50-fache Vergrößerung, NA=0,55) [HOFFMANN 2009]

Konfokale Verfahren

Bei konfokalen Verfahren wird ebenfalls ein fokussierter Lichtpunkt einer Weißlichtquelle auf das Werkstück projiziert, jedoch ist nach der Lichtquelle und vor dem Detektor eine Blende mit kleiner kreisförmiger Öffnung installiert, auch Pinhole bezeichnet, [SEEWIG 2009], [WECKENMANN 2012]. Der erfasste Lichtfleck wird größer, wenn die Oberfläche nicht im Fokus ist und der Großteil des Lichts wird von der Blende vor dem Detektor blockiert. Nur bei maximaler Fokussierung passiert die Reflexion des Lichtflecks die Blende. Beim konfokalen Verfahren erfolgt damit eine scharfe Trennung von fokussierten Punkten und nicht fokussier-

ten Punkten. Über vertikales und horizontales Verfahren oder Ablenken kann die Oberfläche abgerastert werden. Die laterale Auflösung wird unterhalb des Rayleigh-Kriteriums angegeben [WECKENMANN 2012] und die vertikale im Bereich einiger Nanometer [SEEWIG 2009]. Wenn bei rauen Oberflächen noch genügend Licht reflektiert wird, kann dieses Prinzip Oberflächenwinkel bis zu 75° erfassen, [HANSEN U.A. 2006].

Technische Ausführungsvarianten dieser Bauart sind neben dem beschriebenen Prinzip die Verwendung einer Laserquelle, das Laserscanning, und eine spektrale Auswertung, der chromatische Sensor [SEEWIG 2009], [WECKENMANN 2012]. Bei letzterem wird durch eine Linse mit hoher chromatischer Aberration der Fokuspunkt einer Weißlichtquelle mit gemischtem Spektrum in Strahlrichtung aufgeweitet, abhängig von der Wellenlänge. Über ein Spektrometer als Detektor ist erkennbar, welche Wellenlänge am stärksten reflektiert wird und darüber wird die Höheninformation bestimmt. Der gleichzeitig erfassbare Höhenbereich liegt je nach System bei 100 µm bis wenige Millimeter [SEEWIG 2009].

Fokusvariation

Ein weiteres Verfahren ist die flächig arbeitende Fokusvariation. Es wird mit einem CCD-Sensor ähnlich einem Mikroskop die Abbildung einer Oberfläche betrachtet. Das optische System hat eine bewusst geringe Tiefenschärfe. Über eine Aktorik wird der Sensor in Richtung Werkstück bewegt und an jeder Höhenposition ein Bild aufgenommen. Durch Bildverarbeitungsalgorithmen wird über die Auswertung des Kontrasts aus dem resultierenden Bilderstapel zu jeder Position bestimmt, welche Bereiche im Bild scharf sind und welche nicht. Die Oberflächenform ergibt sich aus der Aneinanderreihung der ermittelten Punkte pro Ebene. Für die Auflösung wird, je nach Objektiv, bis zu 10 nm vertikal und 0,4 µm lateral angegeben, [SEEWIG 2009]. Spiegelnde Oberflächen eignen sich für dieses Verfahren weniger, da diese gegenüber diffus reflektierenden Flächen zu wenig Struktur zur Kontrastbestimmung bieten.

2.1.5 Rastersondenverfahren

Zusätzlich zu taktilen und optischen Verfahren ist die Klasse der Rastersondenverfahren zu nennen. Bei Rastersondenverfahren kommen Sonden mit Abmessungen im Mikro- bis Nanometerbereich zum Einsatz. Als Wechselwirkung zur Höhendetektion werden verschiedene atomare oder quantenphysikalische Effekte herangezogen, die erst im Mikrometerbereich nutzbar werden. Durch punktweises Abrastern ermöglichen diese Systeme 2,5D-Messungen bei bis zu Subnanometer Auflösung sowohl vertikal als auch lateral. Zum Betrieb werden klassischerweise Piezoaktoren verwendet, die jedoch nur einen geringen Arbeitsbereich zulassen, von z.B. 80 µm x 80 µm x 6 µm bei einem Modell der Firma S.I.S. Erst die Kombination mit Nanokoordinatenmessgeräten ermöglicht rückführbare Messung mit für Mikrokomponenten praxistauglichen Arbeitsbereichen [SCHULZ 2005].

Hauptvertreter der Rastersondenverfahren ist das Rasterkraftmikroskop (AFM) [DANZEBRINK U.A. 2006]. Ein Cantilever mit einer Spitze, deren Verrundungsradius im Nanometerbereich liegt, wird über die zu messende Oberfläche bewegt. Abhängig von der Betriebsart werden repulsive oder attraktive Oberflächenkräfte zur Wechselwirkung genutzt. Bild 11 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Die Wechselwirkung bringt in Abhängigkeit der Oberflächenhöhe den Cantilever zur Auslenkung, welche wiederum über die Ablenkung eines Laserstrahls detektiert wird. Im Vergleich zu Tastschnittgeräten wird hier mit deutlich höherer Auflösung gearbeitet, die erfassbaren Höhenunterschiede sind jedoch durch den Stellweg der Piezoaktoren

auf Mikrometer begrenzt. Vergleichbar ist jedoch die Überlagerung der Spitzenform mit der Oberfläche - nur ein Kontakt an der Front gewährleistet die geringste Messabweichung. Gerade beim AFM führt eine seitliche Antastung an z.B. einer Kante zu einer Veränderung der Oberflächenkräfte durch Änderungen in der Wechselwirkungsfläche. Dies erschwert eine Rekonstruktion der Oberfläche [HÄßLER-GROHNE U.A. 2011], [UKRAINTSEV U.A. 2012].

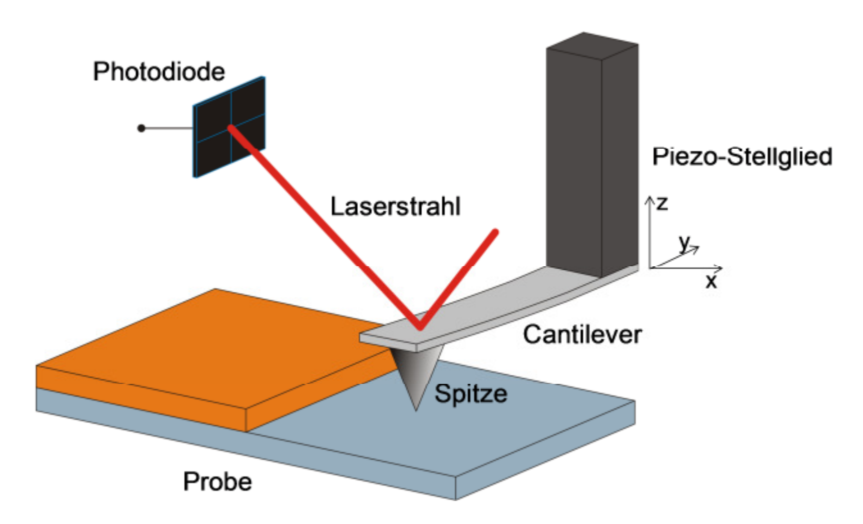


Bild 11: Aufbau eines Rasterkraftmikroskops

Neben Rasterkraftmikroskopen ist das Rastertunnelmikroskop zu nennen, erstmalig in den 1980er Jahren von Binnig und Rohrer [BINNIG U. ROHRER 1983] genutzt. Es wird der quantenphysische Tunneleffekt genutzt, der zwischen zwei leitfähigen Partnern im Abstand weniger Nanometer auftritt. Wird eine Spannung im Millivolt- bis niedrigen Voltbereich angelegt, so lässt sich ein Stromfluss im Nanoamperebereich detektieren, der exponentiell mit Reduktion des Abstandes zunimmt, Gleichung (7), [BHUSHAN 2003], [GÜNTHERODT U. WIESENDANGER 1992]. Über die Auswertung des Stromes bei Lateralbewegung kann ein Höhenbild erfasst werden. Alternativ wird über einen Regelkreis der vertikale Abstand verändert, um den Strom konstant zu halten. Das Höhenbild resultiert in diesem Fall aus der erfolgten Nachstellbewegung.

$$I = A\frac{\sqrt{\phi_{eff}}}{a} \cdot U \cdot e^{\left(-k\sqrt{\phi_{eff}} \cdot a\right)} \quad (7)$$

Mit:

	I	Tunnelstrom
	U	Spannung zwischen Spitze und Probe
	a	Breite der Potentialbarriere
	k	Konstante
	A	Konstante (abhängig von Spitzenform und -material, Probe, etc.)
	Φ_{eff}	Mittelwert der Austrittsarbeit von Spitze und Probe

Dieser Effekt kann in der Messtechnik genutzt werden, indem einer der beiden leitfähigen Partner in Form einer scharfen Metallspitze ausgeformt ist und der andere das Werkstück bildet. Streng genommen wird hierbei die elektrische Zustandsdichte abgebildet, die bei elektrischen Leitern jedoch mit der Oberfläche übereinstimmt. Die Spitzenelektrode wird industriell durch Ätzen hergestellt mit dem Ziel, idealerweise nur ein Atom an der Front zu haben. Dadurch wird die Wirkzone lateral minimiert. Zum Stromfluss tragen primär die vordersten Atome bei, auf welche sich der Effekt konzentriert. Die dahinter liegenden Atome haben

einen reduzierten Beitrag. Bild 12 zeigt die Aufweitung der Wirkzone bei einer stumpfen Spitze. Dies führt zu einer schlechteren lateralen Auflösung und kann durch zeit- und ortsabhängig variierende Spitzensegmente zu Doppelbildern und Rauschen führen. Insbesondere ein Kontakt mit der Spitzenflanke führt zu deutlicher morphologischer Überlagerung der erfassten Oberfläche mit der Spitzenform und erschwert eine kollisionsfreie Abstandsregelung. Deshalb kann dieses Messprinzip mit einer der höchsten erzielbaren Auflösungen nur auf Oberflächen mit geringen Aspektverhältnissen eingesetzt werden. Der geringe Arbeitsabstand erfordert zudem eine aufwändige Abstandsregelung, um kollisionsfrei im Arbeitsbereich zu bleiben. Es ergibt sich, angetrieben durch Piezoelemente, ein vergleichbar Arbeitsbereich wie bei Rasterkraftmikroskopen.

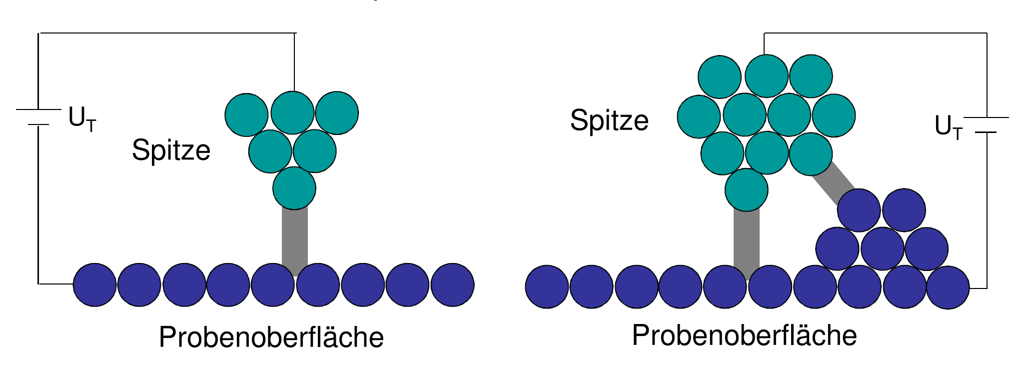


Bild 12: Spitzenstruktur in der Wirkzone [KRÄMER 2007]

2.1.6 Quasitaktiler 3D-Nahfeldsensor

In Weiterentwicklung des Rastertunnelmikroskops und Adressierung dessen Einschränkungen wurde an der Universität Erlangen-Nürnberg am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik ein kontaktloser 3D-Sensor für die Mikromesstechnik entwickelt auf Basis des Tunnelstroms. Die Entwicklung wurde in mehreren Arbeiten dokumentiert: [HOFFMANN 2009], [HOFFMANN U.A. 2009A], [HOFFMANN U.A. 2011], [HOFFMANN U.A. 2009B], [WECKENMANN U.A. 2008A]. Anstelle einer ideal scharfen Drahtspitze wurde durch Nutzung einer kugelförmigen Spitze eine Antastwechselwirkung in drei Dimensionen ermöglicht. Die laterale Ausdehnung der Wirkzone reduziert zwar die laterale Auflösung, jedoch wird der mögliche Arbeitsabstand und nutzbare Arbeitsbereich signifikant erweitert. [HOFFMANN 2009] erklärt dies mit einer Verstärkung des elektrischen Feldes aufgrund des Schottkyeffekts und resultierender Senkung der Potentialbarriere. Im Falle einer Hartmetallkugel von 0,3 mm Durchmesser wurde ein nutzbarer Arbeitsbereich bis zu 200 nm erreicht, abhängig von der Materialpaarung. Die laterale Auflösung wurde experimentell zu 200 nm für die 0,3 mm Kugel bestimmt, die Auflösung in Arbeitsrichtung ist prinzipbedingt im Picometerbereich und wird praktisch von der Auflösung der Auswertelektronik und überlagerten elektromagnetischen Störungen auf Subnanometer begrenzt.

Bild 13 rechts zeigt eine typische ungefilterte Kennlinie des Sensorsignals. Mit Annäherung an die Werkstückoberfläche steigt das Signal exponentiell an, bis die Sensorelektronik in die Sättigung geht. Ein elektrischer Kontakt im klassischen Sinn zwischen Sonde und Werkstück stellt sich erst mit weiterer Annäherung ein und tritt erst nach Erreichen des Maximums der Auswerteelektronik ein. Das System wurde in den Arbeiten von Hoffmann messtechnisch und bezüglich des Funktionsprinzips untersucht [HOFFMANN 2009].

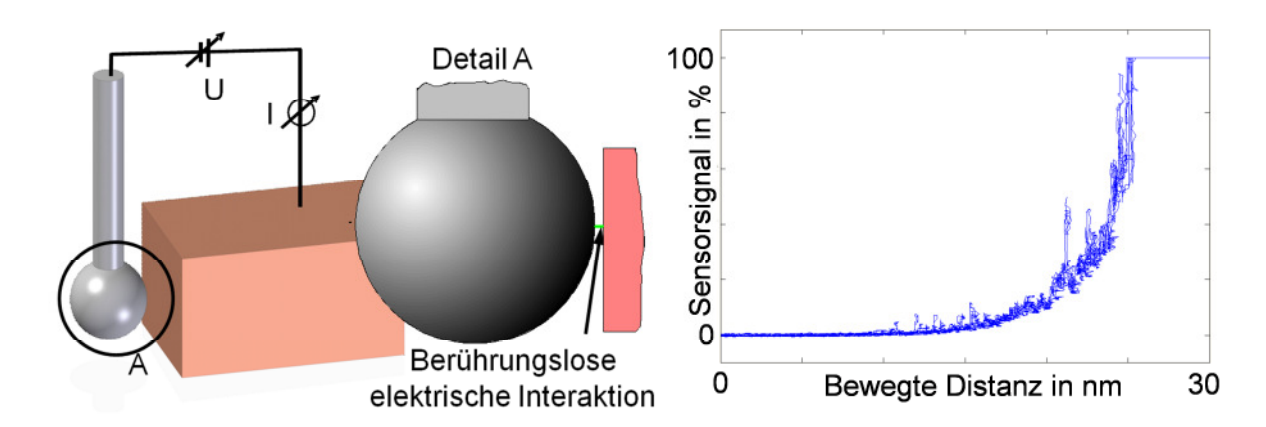


Bild 13: Links und Mitte: Antastung mit sphärischen Sonden. Rechts: Charakteristische Kennlinie

In Verbindung mit einem Nanokoordinatenmessgerät kann der Sensor als 3D-Antastsystem verwendet werden. Beispielsweise wurde durch Nutzung einer Nanopositioniermaschine Typ SIOS NMM-1 ein effektiver Arbeitsbereich des Sensors von 25 mm x 25 mm x 5 mm bei einer Auflösung der laserinterferometrischen Wegmesssysteme von 0,1 nm ermöglicht. Der Sensor auf Basis des Tunneleffekts kann durch Wahl der Spitzenform sowohl wie ein mikrotaktiles System genutzt werden mit einer Kugelspitze als auch ähnlich einem Profilometer mit einer scharfen, konischen Spitze. Gegenüber taktilen Systemen besteht keine Beschränkung hinsichtlich Form, Gewicht oder Größe, da als kontaktfreies System keine Probleme durch zu hohe mechanische Spannungen entstehen [HOFFMANN 2009]. Eine Einschränkung im Vergleich zu mikrotaktilen 3D-Systemen ist, dass eine Antastung in 3D zwar möglich ist, aber nur der Signalbetrag erfasst wird. Die Kontaktrichtung muss indirekt über die Trajektorie ermittelt werden.

2.1.7 Positioniersysteme

Zur Nutzung der beschriebenen Sensorik ist in der Regel noch ein Positioniersystem notwendig. Dessen Komplexität hängt primär von den verwendeten Sensoren ab. Im Falle flächig arbeitender optischer Systeme wie Weißlichtinterferometern oder Fokusvariation erfasst die in der Optik integrierte Aktorik einen Arbeitsbereich im Submillimeter bis Millimeterbereich. Der laterale Arbeitsbereich wird durch die Wahl des Objektivs bestimmt. Um den Arbeitsbereich zu vergrößern sind zusätzliche bewegte Achsen mit anschließendem Stitching überlappender Einzelmessungen notwendig. Für optische Punktsensoren, sowie klassische Tastschnittgeräte sind laterale Achsen zur Durchführung der Scanbewegung immer notwendig. Unter Berücksichtigung eines begrenzten Arbeitsbereiches in Sensorrichtung muss bei darüber hinausgehenden Höhenunterschieden ein Stitching stattfinden. Moderne Ausführungen von Tastschnittgeräten, beispielsweise speziell zur Messung von Optiken, kombinieren laterale Achsen mit einer Drehachse als zylindrisches Koordinatensystem, ähnlich einem Formprüfgerät, [TAYLOR HOBSON 2012]. Insbesondere für taktile, bzw. mikrotaktile Systeme werden als Positioniersysteme Koordinatenmessgeräte mit kartesischen Koordinatensystemen verwendet. Abhängig von der Bauart wird entweder der Sensor in allen Achsen bewegt oder das Werkstück oder eine Mischung beider Varianten. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Ansätzen ist die Position des verwendeten Sensors, beispielsweise eines taktilen Tastsystems, im Maschinenkoordinatensystem durch Einmessen bekannt. Gerade für die Mikromesstechnik und den Betrieb derer Sensoren entstand die Klasse der Mikro- und Nanokoordinatenmessgeräte. Diese unterscheiden sich im Vergleich zu bekannten Koordina-

tenmessgeräten in der erzielbaren Auflösung und Genauigkeit. Beispiele für Mikrokoordinatenmessgeräte sind das Werth Videocheck UA 400 mit 1 nm Achsauflösung und einer dreidimensionale Längenmessabweichung von (0,75 + L/500) µm. Ein weiteres Gerät ist das Zeiss F25 [VERMEULEN U.A. 1998] mit einer volumetrischen Positionsunsicherheit von 250 nm. Im Bereich der Nanokoordinatenmessgeräte ist die IBS Isara mit einer Auflösung von 1,3 nm und einer volumetrischen Positionsunsicherheit von 30 nm [RUJIL 2001], sowie ihr Nachfolgemodell die ISARA 400 zu nennen [SPAAN U. WIDDERSHOVEN 2011]. Ein weiteres relevantes Gerät ist die SIOS NMM-1, [HAUSOTTE 2002], mit einer Auflösung von 0,1 nm und 3 nm Unsicherheit [JÄGER U.A. 2009], das ebenfalls in Weiterentwicklung ist.

2.2 Messaufgaben

Den messtechnischen Möglichkeiten der heutigen Mikromesstechnik steht das heutige Spektrum an Komponenten und Bauteilen gegenüber, vorangetrieben durch die Fortschritte in der Fertigungstechnik. Bauteile und die damit verbundenen Messaufgaben werden im Folgenden betrachtet.

Schneidwerkzeuge

Ein erstes Beispiel sind spanabhebende Werkzeuge, wie die Schneidkanten von Bohrern, Fräsern und Schneideinsätzen. Für einen kontrollierten, gleichmäßigen Materialabtrag beim Zerspanungsprozess ist die Mikrogeometrie der Schneidkante sowie seitens Makrogeometrie die Position der Schneidkante von großer Bedeutung [WECKENMANN U. NALBANTIC 2003]. Bei Schneideinsätzen sind Schneidkantenradien bis 20 µm bei spitzen Eckenwinkeln bis zu 35° verfügbar. Mikrofräser und -bohrer sind durch ihre Gesamtabmessung von 200 µm Durchmesser und weniger sowie Schneidkanten im einstelligen Mikrometerbereich eine herausfordernde Messaufgabe. Eine Erfassung der Kantenform ist besonders wichtig, da diese den Schneidprozess maßgeblich beeinflusst, jedoch im Mikrobereich keine ideal scharfe Kante hergestellt werden kann [HANSEN U.A. 2006], [BISSACCO U.A. 2008].

Die Messung erfolgt sowohl zur Qualitätskontrolle der Werkzeuge als auch zur Verschleißmessung. Als Messgeräte kommen bevorzugt optische Systeme zum Einsatz, jedoch ist der Erfassungsgrad durch die starke Krümmung und Winkeländerung eingeschränkt. Zudem neigen verschlissene Schneidkanten zu Glanz unter der Beleuchtung der optischen Sensoren. Eine Alternative bilden taktile Profilometer, jedoch ist auch hier der erfassbare Winkel eingeschränkt.

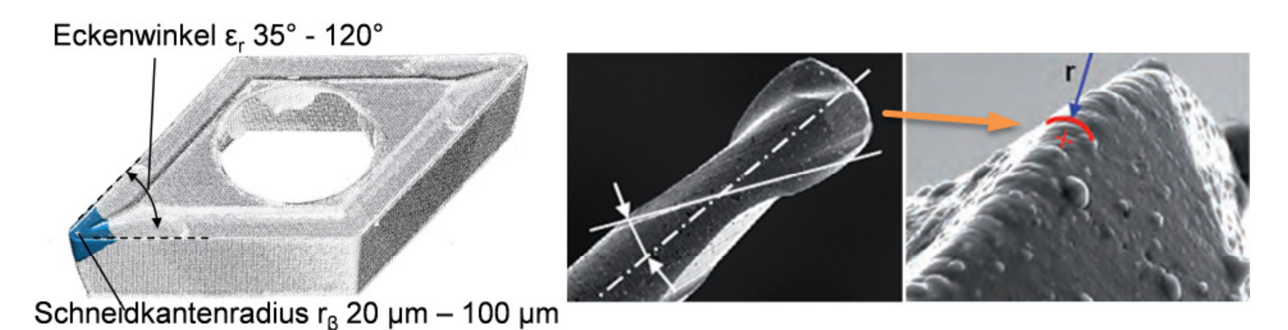


Bild 14: Links: Wendeschneidplatte. Rechts: Mikrofräser [Hansen u.a. 2006]

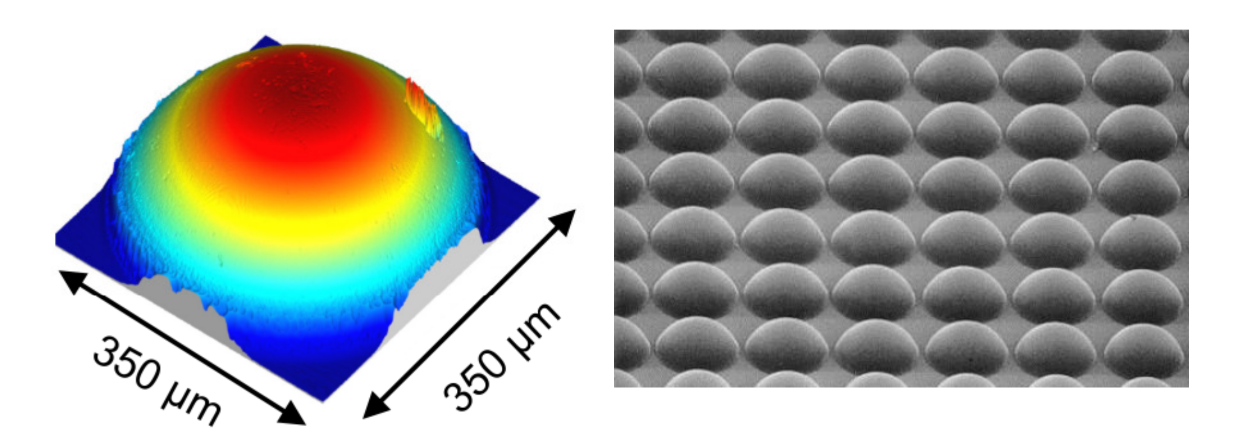


Bild 15: Links: Einzelne Mikrolinse. Rechts: Mikrolinsenarray, Linsenabstand modellabhängig 75 µm bis 300 µm [SUSS 2011]

Optische Komponenten

Ein anderes Beispiel aus dem Bereich neuartiger Produkte stellen Mikrolinsenarrays dar. Sie werden meist im Prägeverfahren hergestellt und bestehen aus hunderten oder tausenden von nebeneinander angeordneten optischen Linsen mit Durchmessern im Mikrometerbereich. Sie kommen als einzelne Elemente in der Nachrichtenübertragung bei Faserkopplern zum Einsatz, in Endoskopen und bei CD-, DVD- und Bluray-Playern. Im Nutzen werden sie unter anderem eingesetzt, um in Digitalkameras das einfallende Licht auf die aktiven Sensorpixel zu fokussieren [EDWARDS U.A. 1993], [VÖLKEL U.A. 2003], [Lin u.a. 2007]. Relevante Größen eines Mikrolinsenarrays, bzw. dessen Prägestempels sind Position, Form und Rauheit der Linsen. Die Erfassung kann hier wieder zum Teil taktil mittels Profilschnitt erfolgen, oder auch teilweise optisch, erneut begrenzt durch den Flankenwinkel bis 60° und in Sonderfällen 90° [HUNG U.A. 2012], [SCHEIDING U.A. 2009]. Insbesondere mikrotaktile System kommen hierbei auch zum Einsatz [BEAUCAMP U.A. 2007], [SCHEIDING U.A. 2009]. Erschwerend kommen oft eine Transparenz der Linsen und eine weiche Oberfläche hinzu. Im Bereich optischer Komponenten sind darüber hinaus Freiformoptiken wie Prismen und Asphären zu nennen, mit ebenfalls hohen Aspektverhältnissen. Die Formgenauigkeit der berechneten Freiformflächen ist für die Funktion entscheidend [ZHANG U.A. 2012]. Zusätzlich können die Linsen mit diffraktiven Elementen überlagert sein, einer definierten Mikrostruktur zur Lichtbeugung und Formung [JIANG U. WHITEHOUSE 2012].

Mikrobauteile

Weitere Beispiele finden sich bei der Miniaturisierung bestehender Produkte durch Fortschritte der Fertigungsverfahren [ALTING U.A. 2003], [HANSEN U.A. 2006]. Ein Beispiel sind Mikrogetriebe und Bauteile von Mikromotoren. Durch Mikrofräsen oder LIGA Verfahren, [BECKER 1986], lassen sich Verzahnungen im Submillimeterbereich und durch Verfahren der Halbleitertechnik im Mikrometerbereich herstellen. Die Prüfung von Verzahnungsparametern, Tragprofilen, Steigung, Pitch oder Lauf wurde im Makrobereich mit spezialisierten Verzahnungsprüfständen durchgeführt [GOCH 2003]. Durch die eingeschränkte Zugänglichkeit der miniaturisierten Exemplare bei gleichzeitig hohen Aspektverhältnissen und dem Bedarf an kalibrierten Referenzzahnrädern sind im Mikrobereich die möglichen Messverfahren eingeschränkt. Aufgrund der stark ausgeprägten Dreidimensionalität werden heutzutage am ehesten mikrotaktile Systeme eingesetzt [GOCH 2003].



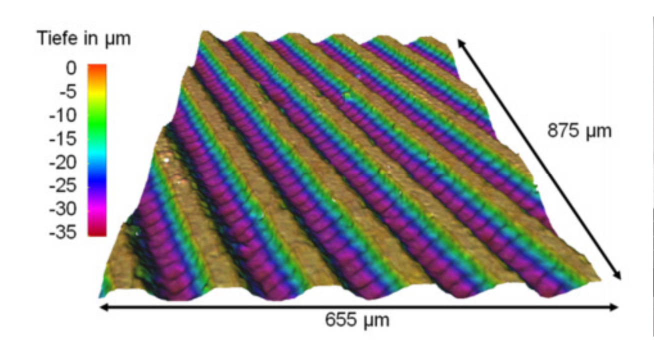
Bild 16: Links: Sonnenrad und Planetenräder eines Planetengetriebes. Rechts: Montiertes Planetengetriebe aus Kunststoff

Mittels Mikrospritzgießen sind weitere Komponenten möglich geworden. Neben Gehäuseteilen von z.B. Hörgeräten ist insbesondere das Feld der Mikrofluidik zu nennen. Pumpmechanismen, Führungskanäle der Breite weniger Mikrometer und Düsen werden für die Dosierung und Verteilung von chemischen Flüssigkeiten und Medikamenten genutzt. Neben der Prüfung der Gussformen der Bauteile sind auch die abgeformten Kunststoffe relevant, die sich durch viele senkrechte Strukturen auszeichnen [Hansen u.a. 2006]. Die Herstellung bedarf einer aufwändigen Überwachung, da fertigungsbedingt noch viel Ausschuss entsteht [BLUNT U.A. 2008]. Die Überwachung erfolgt quantitativ mittels optischer Verfahren, eingeschränkt durch die steilen Kanten, oder qualitativ mittels Rasterelektronenmikroskop.

Funktionale Oberflächen

Zunehmende Bedeutung erhält zudem die Klasse der funktionalen Oberflächen [WECKENMANN U.A. 2011], [ANDERSSON U.A. 2007], [LU U. KHONSARI 2007], [JIANG U. WHITEHOUSE 2012]. Einer Makrogestalt wird hierbei eine Mikrogestalt überlagert, um die spätere Funktion des Bauteils zu unterstützen, bzw. bestimmte Effekte bei der späteren Anwendung zu unterdrücken. Beispielsweise werden Druckwalzen mit einem Näpfchenraster oder einem Linienraster versehen, das als Speicher des Druckmediums dient [WECKENMANN U. HARTMANN 2011]. Über die geometrische Form und Anordnung der Speichertaschen kann das Speicher- und Übertragungsverhalten beim Druck beeinflusst werden. Die linienförmige Speicherstruktur in Bild 17 links weist 25 bis 35 µm tiefe und 110 µm breite Haschuren auf bei einer Trennstegbreite von 20 µm – 30 µm. Die Prüfung kann beispielsweise mittels optischer Verfahren wie der Fokusvariation erfolgen, Bild 17 links. Einschränkend wirken hier jedoch wieder die steilen Flankenwinkel am Rande der Stege, die abhängig vom optischen Messgerät zu nicht messbaren Punkten führen oder eine erhöhte Messabweichung aufweisen.

Eine weitere funktionale Oberfläche mit vergleichbaren Problematiken sind Ribletstrukturen, wie in Bild 17 rechts. Der Natur der Haifischflosse nachempfunden, trägt eine Mikrostrukturierung mittels Rippchen, bzw. Dreiecksstrukturen zu einer Reduktion des Reibungswiderstands in turbulenten Strömungen bei. Technische Anwendungen finden sich im Turbinenbau, sowie in der Kraftfahrzeugindustrie. Erneut ergeben sich Strukturen im Mikrometerbereich, jedoch mit noch steileren Oberflächenwinkeln, was eine optische Messung erschwert.



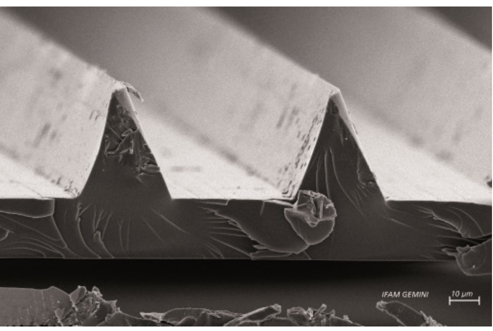


Bild 17: Links: Mikrostruktur Rasterwalze (Messgerät Alicona Infinite Focus Portable, 20x Objektiv). Rechts: Ribletstruktur (Maßstab 10 µm) [IFAM 2011]

Aus diesen Beispielen moderner Messaufgaben lassen sich die Anforderungen an die Messtechnik ableiten, die mit wachsender Geschwindigkeit kontinuierlich weiter steigen. Zusammenfassend treten Bauteile im Makrobereich mit Strukturen oder Merkmalstoleranzen im Mikrometerbereich auf, sowie zum anderen Bauteile mit Gesamtabmessungen im Mikrometerbereich. Die Strukturen weisen hohe Aspektverhältnisse auf und erlauben durch die Strukturgrößen nur eine begrenzte Zugänglichkeit für taktile Verfahren. Nach Berndt's Goldener Regel der Messtechnik werden bei den vorliegenden Größen Auflösungen im einstelligen Nanometerbereich benötigt. [BERNDT U.A. 1968] Diese kombinierten Anforderungen schränken die anwendbaren Verfahren ein. Weitere Einschränkungen ergeben sich je nach Bauteilen zusätzlich aus den verwendeten Materialien, wie weichen Kunststoffen oder transparenten Werkstoffen.

2.3 Defizite der heutigen Messtechnik

Ein Vergleich der dargestellten Anwendungsbeispiele heutiger Mikromesstechnik mit den heutigen Sensoren weist eine Diskrepanz zwischen Anforderungen und Möglichkeiten auf.

Optische Systeme spielen ihre Stärke bei der Aufzeichnung vieler Messpunkte in kurzer Zeit aus. Zudem ist durch die Kontaktlosigkeit eine Oberflächenbeschädigung ausgeschlossen. Nachteilig ist die Abhängigkeit von optischen Eigenschaften des Werkstücks, wie der Brechzahl des Werkstoffs, sowie von Reflexion und Transmission. Von besonderer Problematik bei Mikrobauteilen mit hohen Aspektverhältnissen sind der begrenzte erfassbare Steigungswinkel der optischen 2,5D-Systeme, sowie Störeffekte an Kanten, wie z.B. Batwings. Die Messergebnisse sind im Vergleich zu Tastschnittgeräten nicht immer zu 100% vergleichbar, schon allein aufgrund der unterschiedlichen Funktionsprinzipien, [WECKENMANN 2012]. Insbesondere mit steigenden Oberflächenwinkeln wurden Unterschiede zu taktilen Ergebnissen gezeigt [DE CHIFFRE U. HANSEN 1995], [LONARDO U.A. 1996], [GAO U.A. 2008].

Bei Tastschnittgeräten sind optische Eigenschaften irrelevant, jedoch kann eine geringe Werkstoffhärte, insbesondere bei Kunststoffen, wegen einer Oberflächenbeschädigung die Messung einschränken. Durch die Form der Spitze und die Annahme eines festen Kontaktpunktes ist auch hier der erfassbare Oberflächenwinkel eingeschränkt. Es kommt zu einer Überlagerung der Spitzengestalt mit der Werkstückgestalt und ein Flankenkontakt bei Verlassen der Spitzenfront führt zu signifikanten Messabweichungen [LONARDO U.A. 1996], [HANSEN U.A. 2006], [BEAUCAMP U.A. 2007]. Gegenüber optischen Verfahren sind Tastschnittgeräte jedoch beherrschter und besser in den Normen erfasst [WECKENMANN U.A. 2008B].

Rastersondenverfahren, insbesondere Rasterkraftverfahren, haben aufgrund der vernachlässigbaren Antastkraft keine Probleme mit weichen Werkstoffen. Der geringe Arbeitsbereich und die geringere Zugänglichkeit durch die Sondengröße schränken die Anwendung jedoch wieder ein. So können nur Werkstücke mit Abmessungen im Mikrometerbereich oder Ausschnitte von Werkstücken gemessen werden. Es gelten wegen der Spitzenform die gleichen Überlagerungseffekte wie bei Tastschnittgeräten, mit den gleichen Einschränkungen durch die kleineren Radien und Spitzen, jedoch in einer geringeren Größenordnung.

Mittels mikrotaktiler Systeme wäre eine 3D-Messung ohne Beschränkung des Flankenwinkels möglich, jedoch sind diese aufgrund der Tastelementgröße nicht bei allen Werkstücken anwendbar. Die Tastelementgröße beschränkt zugleich die erfassbare Strukturauflösung. Es gelten die gleichen Einschränkungen hinsichtlich Werkstoffhärte wie bei den Tastschnittgeräten. Problematisch ist zudem die starre Schaftausrichtung, die eine Messung von Hinterschneidungen verhindert und die Messung in Mikrolöchern erschwert. Im Gegensatz zu makrotaktilen Systemen wurden bei mikrotaktilen Systemen Sterntaster nur in ersten Entwürfen gezeigt [SCHRADER U.A. 2011].

Gemeinsame Defizite

Eine Gemeinsamkeit aller Sensoren liegt in ihrer Begrenzung auf 2,5 Dimensionen, von mikrotaktilen Systemen abgesehen, und der damit verbundenen Einschränkung des erfassbaren Oberflächenwinkels. Bei Überschreitung des für den jeweiligen Sensor vorherrschenden Grenzwertes steigt die Messabweichung an oder eine Messung ist unmöglich. Bild 18 zeigt die Begrenzung am Beispiel eines Profilometers und eines optischen Punktsensors auf einer Mikrostruktur. Die Oberfläche kann mit beiden Verfahren nur bruchstückhaft erfasst werden. Diese Problematik stellt eine deutliche Einschränkung aller verfügbaren Sensoren dar. Dieses Thema soll deshalb im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden.

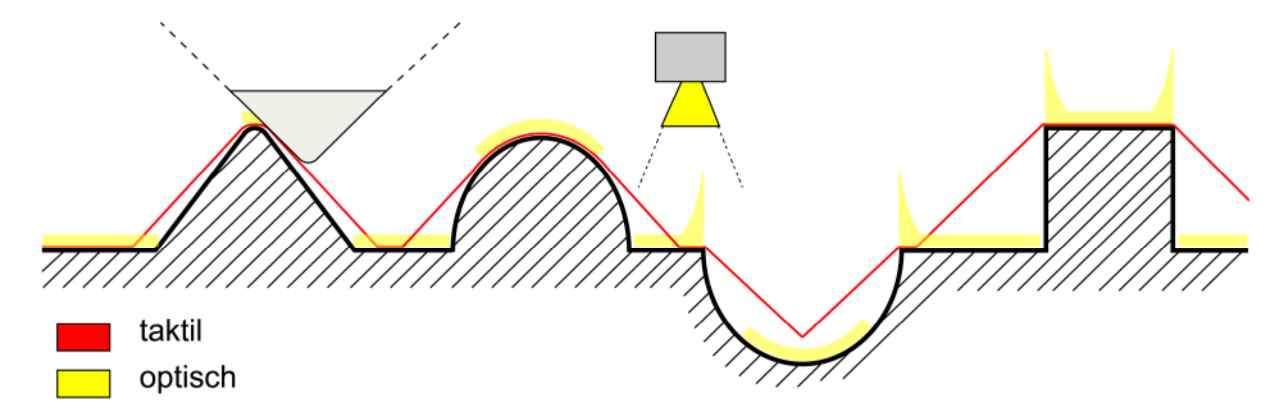


Bild 18: Messabweichung von optischen und taktilen Verfahren an hohen Oberflächenwinkeln

Bestehende Ansätze

Einer der bestehenden Ansätze zur Senkung der winkelabhängigen Abweichung besteht in einer Drehung des Sensorkopfes vor der Messung. Er wird auf den Winkel eines bestimmten Oberflächenbereichs von Interesse ausgerichtet. Im ausgewählten Bereich ist der Winkel zwischen Sensor und Oberfläche nun optimiert und die Messabweichung lokal reduziert [WECKENMANN U. WIEDENHÖFER 2004]. Jedoch sind alle anderen Oberflächenbereiche bei nun suboptimalem Winkel mit erhöhter Abweichung belastet. Bei Profilometern kann beispielsweise vor der Messung der Messkopf geneigt werden, [TAYLOR HOBSON 2012]. Im Falle taktiler Systeme kann die Richtungsänderung auch durch gewinkelte oder auskragende Spit-

zen realisiert werden. Lebrasseur erfasst z.B. durch einen gewinkelten Profilometerarm auf Siliziumbasis die Innenwände von Bohrungen [LEBRASSEUR U.A .2002]. Martin und auch Foucher zeigen das Prinzip bei einem AFM, das durch Gestaltung der Spitze besonders gut die Seitenwände von Mikrowällen erfassen kann, jedoch weniger gut deren Oberseite [MARTIN U. WICKRAMASINGHE 1994], [FOUCHER U.A. 2011]. Die Verwendung auskragender Taster ist auch im Makrobereich bei Koordinatenmessgeräten bekannt. Diese sind dort meist fest ausgerichtet als Sterntaster, es gibt jedoch auch Varianten wie das Renishaw REVO System, bei dem die Ausrichtung motorisiert verändert werden kann. [RENISHAW 2011], [WECKENMANN U.A. 2004]. Sie sind in [DIN EN ISO 10360-1 2003] als Dreh-Schwenk-Messkopfsysteme bezeichnet. Hier kommen jedoch nur makroskopische 3D-Tastsysteme zum Einsatz, eine Verwendung mit Sensoren der Mikromesstechnik ist aufgrund der Größe und der für die Mikromesstechnik unzureichenden Positioniergenauigkeit nicht möglich.

Durch eine nachträgliche Messdatenverarbeitung am Computer ist es seit wenigen Jahren möglich, Daten aus verschiedenen Messungen mit unterschiedlichen Sensorneigungswinkeln zu einer gemeinsamen Messung zusammenzuführen. Dieser Vorgang wird als Datenfusion bezeichnet und wurde sowohl bei optischen Systemen demonstriert [MARINELLO U.A. 2007] und implementiert [ALICONA 2012], [PRANTL U.A. 2011], als auch bei modernen Tastschnittgeräten bzw. Rasterkraftmikroskopen [HUA U.A. 2010] gezeigt. Nachteilig ist bei diesem Vorgehen der hohe Zeitaufwand für wiederholte Messungen unter einer ausreichenden Anzahl von Winkeln. Zudem liefert die Datenfusion einen zusätzlichen Unsicherheitsbeitrag durch die Segmentierung und überlappende Aneinanderreihung der Messdaten [WECKENMANN U.A. 2009B].

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion von Messabweichungen bei Oberflächenneigungen kann bei Tastschnittgeräten und Rasterkraftmikroskopen angewendet werden. Durch Kenntnis der allgemeinen Spitzenform bis hin zur Kenntnis deren Formabweichung kann eine Dekonvolution der erfassten Oberfläche erfolgen [MACHLEIDT U. FRANKE 2004], [BUKHARAEV 1998]. Dieser Vorgang erfolgt im Computer nach der Messung und reduziert die Abweichung zu einem gewissen Grad, insbesondere bei Kontaktpunktauswanderung im Verrundungsbereich der Spitze. Bei Flankenkontakt hingegen ist eine saubere Rekonstruktion oft nicht mehr eindeutig möglich, [KELLER 1991], [STOUT 1993], [LONARDO U.A. 1996]. Erschwerend kommt bei der Dekonvolution eine Abweichung der Spitzenmikrokontur vom erwarteten Modell hinzu [RUBERT U. FRENZEL 2004].

3 Wissenschaftlicher Ansatz

Unter Berücksichtigung der bestehenden Ansätze zur effektiven Reduktion der Winkelbeschränkung soll ein Verfahren entwickelt werden, das die Messabweichung aufgrund eines nichtorthogonalen Sensorkontaktwinkels reduziert und den nutzbaren Winkelbereich erhöht. Dies soll erfolgen durch eine Nachführung des Sensorwinkels während eines einzelnen Messvorgangs. Die Sensorneigung im Scanbetrieb hält den Sensor im Arbeitsbereich und macht wiederholte Messungen unter mehreren Winkeln mit anschließender Datenfusion hinfällig. Dies reduziert die benötigte Zeit für die Messung, macht eine komplizierte Nachbearbeitung hinfällig und vermeidet Unsicherheitsbeiträge durch die Datenfusion. Das Verfahren ist auf alle gezeigten 1D und 2,5D Sensoren der Mikro- und Nanomesstechnik anwendbar und soll exemplarisch an einem mikrotaktilen System demonstriert werden.

Das Prinzip wird in Bild 19 links verdeutlicht anhand eines Tastschnittgeräts. Die Messung eines Dreieckprofils erfolgt mit einer festen Ausrichtung der Tastspitze, senkrecht zur Profilbasis. Es ergeben sich mehrere Kontaktsituationen, beginnend mit einer Berührung an der Seite der Tastspitze, gefolgt vom Rand der sphärischen Spitzenfront, bis hin erneut zu einer seitlichen Berührung. Nur am Pol des Profils liegt ein Kontakt im Referenzkontaktpunkt des Sensors vor. Bei der Rekonstruktion des Oberflächenprofils wird ein Kontakt an der Front der Spitze angenommen, abweichend von der tatsächlichen Kontaktsituation [LONARDO U.A. 1996]. Diese morphologische Überlagerung der Spitzenform mit der lokalen Oberflächenform und die resultierende Auswanderung aus dem angenommenen Kontaktpunkt führen zu einer Abweichung des erfassten Profils vom erwarteten. Insbesondere wenn ein Kontakt mit der Flanke der Spitze auftritt, steigt die Abweichung an [HANSEN U.A. 2006]. Mit dem vorgeschlagenen Verfahren wird der Sensor während der Messung um seinen Arbeitspunkt gedreht, um immer einen idealen Kontaktwinkel von 90° zur Oberfläche zu halten, Bild 19 rechts. Hierdurch bleibt während der Messung der tatsächliche Kontaktpunkt an der Stelle des Referenzpunkts und die Messabweichung durch den Oberflächenwinkel wird verhindert.

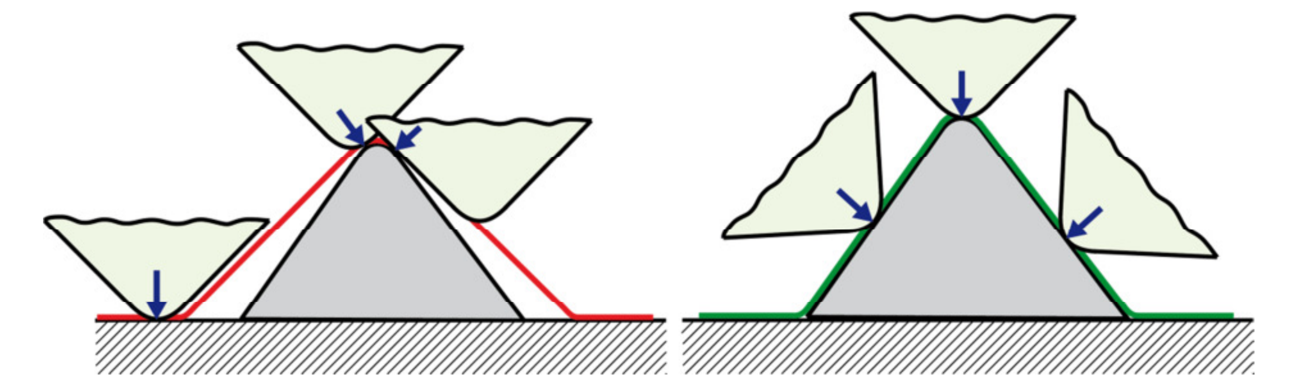


Bild 19: Rekonstruiertes Oberflächenprofil bei klassischer Messung. Rechts: Rekonstruiertes Oberflächenprofil unter Verwendung von Sensorrotation. Pfeile zeigen tatsächlichen Kontaktpunkt.

Im Detail soll die systematische Entwicklung dieses Verfahrens, dessen Realisierung in der Praxis, sowie eine Bestimmung des Nutzens in mehreren Schritten erfolgen. Der erste Schritt ist die Modellierung des Sensorverhaltens als Basis theoretischer Untersuchungen. Dessen geometrisches Modell und die mathematische Formulierung des Übertragungsverhaltens werden genutzt, um die Messabweichung unter einem bestimmten Winkel zu einer beliebigen Oberfläche zu ermitteln. Als zu modellierender Sensor soll ein taktiles Profilometer herangezogen werden. Nach Aufstellung des Sensormodells soll es in eine Simulationsumgebung implementiert werden. Sie ermöglicht, den Messvorgang sowohl ohne Rotation,

als auch mit abzubilden und auftretende Messabweichungen zu erfassen. Dies ist die Basis, um informationstechnische Methoden zu entwickeln, die während der Messung einem Oberflächenpunkt einen Drehwinkel des Sensors zuordnen. Es lassen sich so vorab die Effektivität des Neigungsverfahrens ermitteln und Vorgaben für eine Hardwarerealisierung geben.

Auf Basis der Erkenntnisse der Simulation folgt die Planung einer kinematischen Kette zur Realisierung der Rotationsbewegung in der Praxis. Die Positioniergenauigkeit der Kinematik ist essentiell für die Maximierung des Nutzens durch das Neigungsverfahren. Bedingung ist, dass die Reduktion der Messabweichung durch die Rotation größer ist als eine auftretende Auswanderung des Sensorarbeitspunktes vom zu messenden Oberflächenpunkt.

Nach Auswahl und Konstruktion der kinematischen Kette ist diese in einem Prüfstand zu integrieren. Als Basisgerät soll ein Nanokoordinatenmessgerät zum Einsatz kommen, das um die Kinematik erweitert wird. Neben einer mechanischen Integration erfordert dies eine elektrische Integration sowie eine softwareseitige. Dies umfasst eine übergeordnete Ablaufsteuerung und die Integration der Steuerlogik für die Rotation während der Messung.

Als Sensor soll ein quasi-taktiler Sensor auf elektrischer Nahfeldwechselwirkung genutzt werden. Dieser erlaubt in Übereinstimmung mit dem Simulationsmodell zu arbeiten bei jedoch Sub-Nanometer Auflösung und dem Wegfall mechanischer Einschränkungen bei der Spitzenwahl. Ein Betrieb von Profilometerspitzen als auch Kugeltastern ist möglich und er eignet sich durch 3D-Fähigkeit zur Kalibrierung der Rotationskinematik. Der Sensor ist in das Nanokoordinatenmessgerät zu integrieren, erneut auf elektrischer, mechanischer und softwareseitiger Ebene. Durch einen hohen Grad der Miniaturisierung erfolgt die Integration platz- und gewichtssparend.

Es folgt eine in-situ Kalibrierung des Sensors und der Rotationseinheit in Verbindung mit dem Sensor, um erfassbare systematische Positionsabweichungen zu kompensieren. Die Position des Sensors im Gerätekoordinatensystem ist dazu zu bestimmen. Sie soll über den Rotationsbereich erfasst werden und es sollen mit dem Nanokoordinatenmessgerät über ein Kalibrierfeld systematische Abweichungsanteile kompensiert werden. Nach Inbetriebnahme des Prüfstands wird das Funktionsprinzip an Demobauteilen dargestellt und die Abweichungsreduktion durch Rotation ermittelt. Deren Auswertung ergibt eine Bewertung des Nutzens des Prinzips, der Anwendungsgrenzen und der Übertragbarkeit auf andere Verfahren.

Die Neuartigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens zeichnet sich durch die erstmalige Verwendung der Sensorwinkelnachführung während einer Messung im Bereich der Mikro- und Nanomesstechnik aus. Erst die in-situ Kalibrierstrategie auf Basis des quasi-taktilen Sensors ermöglicht die Kompensation der Auswanderung des Sensorarbeitspunkts aufgrund von systematischen Abweichungen der Rotationskinematik. Durch Nutzung eines Nanokoordinatenmessgerätes resultiert in Verbindung mit der Kalibrierstrategie erstmals eine derart geringe Wiederholpräzision, so dass die Rotation eines Sensors während einer Messung praxistauglich für die Mikromesstechnik wird. Eine zeitintensive Nachbearbeitung durch Datenfusion oder Tastelementformkorrektur mit weiteren Unsicherheitsbeiträgen wird hinfällig und das fertige Ergebnis ist direkt nach nur einer Messung verfügbar. Der Einsatz dieses Verfahrens steigert in Folge die Messgenauigkeit bestehender Sensoren der Mikromesstechnik auf gekrümmten Oberflächen und Mikrostrukturen mit erhöhten Aspektverhältnissen und er steigert den erfassbaren Winkelbereich, was die Anwendungsgebiete der Sensoren erweitert.

4 Simulation des Rotationsprinzips

Die theoretische Untersuchung des vorgeschlagenen Rotationsprinzips soll in einer Simulationsumgebung erfolgen auf Basis eines Simulationsmodells zur Abbildung des Messprinzips.

4.1 Modell und Logik

Als Anschauungsobjekt des Rotationsprinzips in der Simulation wurde ein Tastschnittgerät gewählt. Neben der Relevanz in der Mikromesstechnik ist dessen Funktionsprinzip und Abweichungsmechanismus gut verstanden und berechenbar [STOUT 1993], [LONARDO U.A. 1996]. Eine Modellierung des Abweichungsverhaltens von Profilometern lässt sich über den mechanischen Kontakt zweier geometrischer Körper einfacher und zuverlässiger darstellen als eine optische Wechselwirkung. Für optische Systeme müssen zur Modellierung der komplexen Interaktion oft rechenintensive numerische Verfahren wie Finite Difference Time Domain (FTDT) eingesetzt werden [OH U. ESCUTI 2007]. Zudem ist das Verfahren auf quasitaktile Systeme und in Näherung auf Rasterkraftverfahren direkt übertragbar. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, wird bei der Oberflächenrekonstruktion aus den erfassten Höhenwerten eines Profilometers von einem Kontaktpunkt am Pol der Tastspitze ausgegangen, der jedoch bei erhöhten lokalen Oberflächenwinkeln nicht vorliegt - eine Abweichung nach Gleichung (5) resultiert. Im Falle eines Kontaktes im Flankenbereich hängt die laterale Auswanderung des Kontaktpunkts von der Geometrie der Werkstückoberfläche ab und die Abweichung steigt stark an. Ein weiterer zu berücksichtigender Effekt besteht in der elastischen Deformation des Werkstücks durch die Anpresskraft des Cantilevers. Die Kraft soll senkrecht zur Oberfläche eingeleitet werden, was nur im Pol der Spitze der Fall ist. Eine Auswanderung des Kontaktpunktes führt mit zunehmendem Winkel zu quer laufenden Kraftkomponenten. Ausgehend von der Annahme, dass bei einem idealen Kontaktwinkel dieser Betrag konstant bleibt, wurde von dessen Einbezug in das genutzte Abweichungsmodell abgesehen. Ebenfalls bei Profilometern zu berücksichtigen ist die Korrektur des Bogens, den die Spitze bei Auslenkung beschreibt. In Verbindung mit dem geplanten Nanokoordinatenmessgerät fungiert der Sensor als Nullindikator und nur das Werkstück wird translatorisch bewegt. Dadurch wird eine Bogenkorrektur durch geringe Auslenkung hinfällig.

Zur automatisierten Berechnung der auftretenden Abweichung ist es notwendig sowohl von der Tastspitze als auch der zu messenden Oberfläche ein Modell in Form einer geometrischen Repräsentation zu haben. Im Falle der Spitze ergibt sich diese auf Basis der Norm [DIN EN ISO 3274 1997] „Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten“ und [DIN EN ISO 25178-601 2011] „Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster)“ als ein Kegel mit dem Öffnungswinkel γ und abgerundeter Spitze mit dem Spitzenradius r_{tip}. Ausgehend von einem lokalen Koordinatensystem der Tastspitze mit dem Mittelpunkt M lässt sich die Spitze als ein Kreisbogen mit dem Radius r um M modellieren, der auf beiden Seiten in Geraden mit dem gemeinsamen Öffnungswinkel γ übergeht. Der Pol des Bogens und spätere Kontaktpunkt T befindet sich auf der Mittellinie im Abstand r unterhalb M. Die Übergangspunkte zwischen den Segmenten sowie die des Modells der Höhe h lassen sich mit den Gleichungen (8) bis (10) beschreiben, zwischen diesen die Gleichung für eine Gerade bzw. Kreisbogen gültig sind, Bild 20.

$$\vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{l,u}} = r \cdot \begin{pmatrix} -\cos\frac{\gamma}{2} \\ -\sin\frac{\gamma}{2} \end{pmatrix} \quad ; \quad \vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{r,u}} = r \cdot \begin{pmatrix} \cos\frac{\gamma}{2} \\ -\sin\frac{\gamma}{2} \end{pmatrix} \tag{8}$$

$$\vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{l,o}} = \vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{l,u}} + (h-r) \cdot \begin{pmatrix} -\sin\frac{\gamma}{2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad ; \quad \vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{r,o}} = \vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{r,u}} + (h-r) \cdot \begin{pmatrix} \sin\frac{\gamma}{2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{für}\, h > r \tag{9}$$

$$\vec{t} = r \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \tag{10}$$

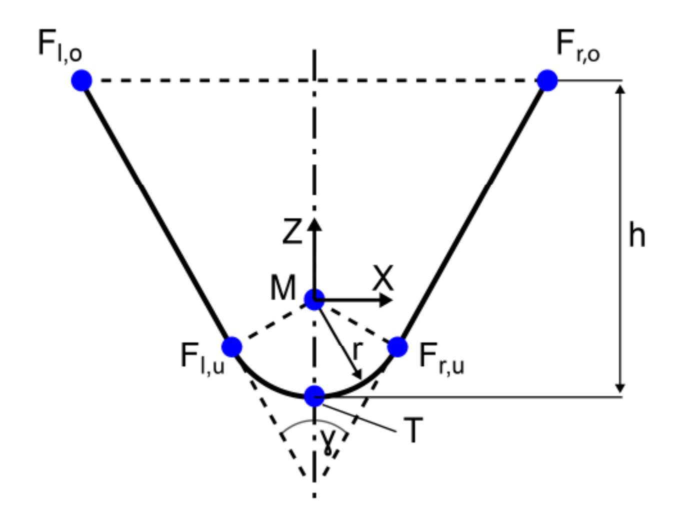


Bild 20: Geometrisches Modell der Spitzenform, bestehend aus Mittelpunkt, Kreisbogen und Geraden. Der Ursprung des spitzeneigenen Koordinatensystems liegt im Mittelpunkt.

Im Gegensatz zum Modell der Spitze wird die Oberfläche nicht über kontinuierliche geometrische Funktionen abgebildet, sondern in diskreter Form aufgebaut. Dies wird einer beliebigen Komplexität zu untersuchender Oberflächen gerecht und ist notwendig für eine effiziente Darstellung in einer Computerumgebung. Eine kontinuierliche Oberfläche wird hierbei in eine begrenzte Anzahl von Stützpunkten reduziert. Die resultierenden Stützpunkte P(x, z = f(x)) geben an der Werkstückposition x eines zweidimensionalen Profilschnitts dessen Höhe z = f(x) der Oberflächenfunktion wieder. Dies spiegelt zudem den Betrieb eines Tastschnittgeräts in der Praxis wieder, da dieses ebenfalls, abhängig von der eingestellten Auflösung, die Oberflächenhöhe punktweise erfasst. Zur Diskretisierung in diese Darstellung ist es notwendig, dass das Eingangsprofil surjektiv ist, jedem Oberflächenpunkt x nur ein Höhenwert z = f(x) zugeordnet ist, jedoch ein Höhenwert an mehreren Oberflächenpunkten resultieren kann. In einem Vereinfachungsschritt werden deshalb Hinterschneidungen entfernt und ideale Senkrechte abgeflacht. Da Hinterschneidungen im Rahmen der Untersuchungen mittels simuliertem Tastschnittgerät nicht im Fokus stehen, kann mit dieser Einschränkung gearbeitet werden. Die Reduktion der unendlichen Steigung auf eine endliche kann durch eine hohe Punktdichte und Genauigkeit im Computersystem vernachlässigt werden. Ein weiterer Einflussfaktor durch die Diskretisierung wird als Tesselierungsabweichung bezeichnet. Sie stellt die Abweichung eines ursprünglichen Oberflächenpunktes zum diskretisierten Gegenstück dar, das aus den benachbarten, tesselierten Stützpunkten extrapoliert wurde. Durch Wahl einer Stützpunktdichte im Computer, die um ein vielfaches höher als die auftretende Profilhöhenänderung liegt, kann dieser Einfluss ebenfalls vernachlässigt werden.

Sowohl Modell der Spitze als auch Oberflächenmodell werden zur Vereinfachung der Darstellung im zweidimensionalen Raum betrachtet. Dies ist äquivalent zu einem einzelnen Tastschnitt eines Profilometers. Wenn die Höhenänderungen quer zum Tastschnitt gering ist, was in der Praxis oft bewusst so gewählt wird, kann das Rotationsprinzip im zweidimensionalen Raum mit hinreichender Aussagekraft der Ergebnisse simuliert werden.

Zur Durchführung einer simulierten Messung mit der Spitze und der Oberfläche ist zudem die zu nutzende Logik festzulegen. Diese basiert auf einer Kollisions- bzw. Überlappungskontrolle. Während der simulierten Messung wird für jeden zu erfassenden Oberflächenpunkt $P_{O,E}$ das Spitzenmodell unter seinem aktuellen Drehwinkel an die X-Koordinate des aktuellen Punktes $x_{O,E}$ positioniert. Die z-Koordinate der Spitze wird derart gewählt, so dass der Spitzenpol direkt auf dem zu erfassenden Oberflächenpunkt aufliegt, $z_{O,E}$. Sofern $P_{O,E}$ nicht in den Stützpunkten enthalten ist, wird dieser interpoliert. Es folgt die Kollisionskorrektur zur Aufhebung nun eventuell entstandener Modellüberlappungen, Bild 21. Für jeden diskreten Oberflächenpunkt wird der Abstand in Z-Richtung zum Spitzenmodell berechnet. Im Falle negativer Werte wird das Spitzenmodell um den größten auftretenden Wert unter Berücksichtigung einer Interpolation der Stützpunkte in diesem Bereich in Z-Richtung verschoben. Die nun resultierenden Koordinaten der Spitze und deren Pol ergeben den simulierten Messwert unter der lokalen Kontaktsituation. Die Prozedur wird mit dem jeweils nächsten zu erfassenden Oberflächenpunkt $P_{O,E+1}$ wiederholt, bis das Ende der Oberfläche erreicht ist.

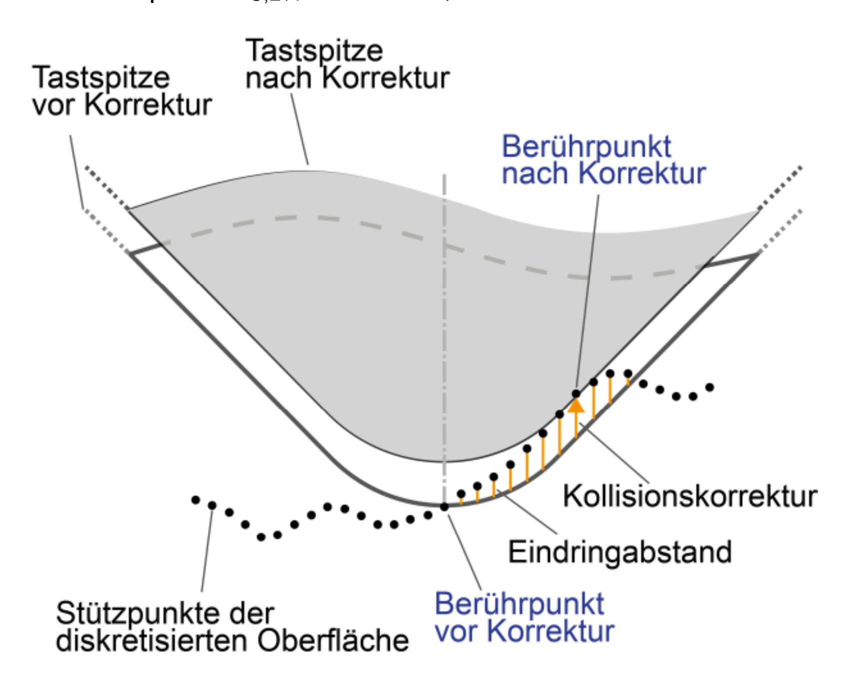


Bild 21: Kollisionsprüfung und -korrektur durch Bestimmung des Höhenunterschiedes zwischen Spitzenmodell und Oberflächenmodell

Um rechnerisch bestimmen zu können, ob ein Oberflächenpunkt höher als die Spitzenkontur liegt und diese schneidet, muss die Höhe der Spitzenkontur an jedem diskreten Oberflächenpunkt bestimmt werden. Dazu werden zwischen den Übergangspunkten aus (8) bis (10) die Gleichungen für Geraden und einen Kreisbogen berechnet. Für den Bogen mit dem Mittelpunkt $M = (m_x, m_z)$ wird von der Gleichung eines Halbkreises ausgegangen, Gleichung (11):

$$k(x) = -\sqrt{r^2 - (x - m_x)^2} + m_z \tag{11}$$

Diese Gleichung ist auf ein Intervall $[x_{K,l}, x_{K,r}]$ beschränkt, das durch die Übergangspunkte zu den Geraden links $x_{K,l}$ und rechts $x_{K,r}$ bestimmt wird, Bild 22 a). Für eine senkrecht stehende Spitze lassen sich die zugehörigen Koordinaten über Gleichung (12), (13), den Öffnungswinkel γ und den Gültigkeitsbereich D_K bestimmen.

$$D_K = [\mathrm{f}_{l,u,x};\mathrm{f}_{r,u,x}] \quad ; \quad x_{K,l} = m_x - r\cdot\cos\frac{\gamma}{2} \quad ; \quad x_{K,r} = m_x + r\cdot\cos\frac{\gamma}{2} \tag{12}$$

$$z_{K,l} = z_{K,r} = m_z - r\cdot\sin\frac{\gamma}{2} = k(x_{K,l}) = k(x_{K,r}) \tag{13}$$

Bei einer gedrehten Spitze ergeben sich der entsprechende Anfangs- und Endpunkt im Werkstückkoordinatensystem aus diesen Werten durch Koordinatentransformation und Rotationsmatrizen. Zu beachten ist jedoch der Gültigkeitsbereich der Halbkreisgleichung, da bei starker Neigung der Übergangspunkt zwischen Bogen und Gerade oberhalb des Bogenmittelpunkts liegt und einem Oberflächenpunkt mehrere Spitzenpunkte zugeordnet werden können, Bild 22 b) und c).

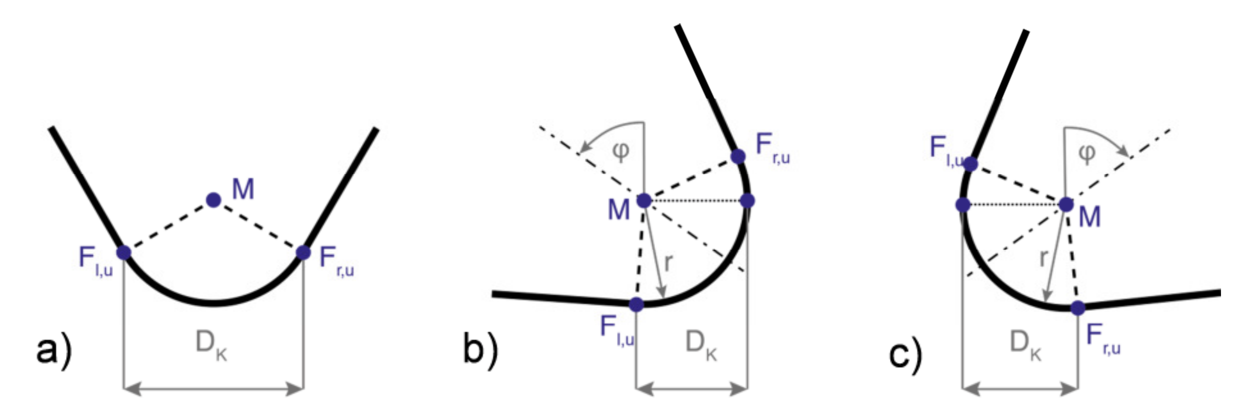


Bild 22: Intervallgrenzen geneigter Spitzen

Für die Sonderfälle starker Drehung nach links bzw. Drehung nach rechts werden deshalb die Intervallgrenzen nach Gleichung (14) (Bild 22 b) bzw. Gleichung (15) (Bild 22 c) angenommen:

$$D_K = [\mathrm{f}_{l,u,x};\mathrm{m}_x + \mathrm{r}] \quad ; \quad \mathrm{z}_{\mathrm{K,r}} > \mathrm{m}_z \rightarrow x_{K,r} = m_x + r \tag{14}$$

$$D_K = [\mathrm{m}_x - \mathrm{r};\mathrm{f}_{r,u,x}] \quad ; \quad \mathrm{z}_{\mathrm{K,l}} > \mathrm{m}_z \rightarrow x_{K,l} = m_x - r \tag{15}$$

4.2 Erstellte Softwareumgebung

Die beschriebene Simulationslogik wurde in einer Simulationsumgebung zur Durchführung auf PCs realisiert. Als Programmiersprache wurde die objektorientierte, plattformübergreifende Sprache Java verwendet und die Entwicklungsumgebung Eclipse. Der Simulatorkern wurde in Vorarbeiten am Lehrstuhl erstellt, [HETZNER 2006], und im Rahmen dieser Arbeit um das Strategiemodul, das Auswertemodul und die Prozessdatenerfassung erweitert. Über die Erweiterung wurde in [WECKENMANN U.A. 2012] berichtet.

Die Simulationsumgebung macht sich eine hohe Modularität und Schnittstellendenken zu nutzen, um flexibel an neue Anforderungen angepasst oder um andere Sensorprinzipien erweitert zu werden. Neben Funktionen für Benutzereingabe und grafische Ergebnisdarstel-

lung wurden die Einzelkomponenten eines Tastschnittgeräts aufgegriffen, um modularisiert die Simulationslogik abzubilden. Bild 23 zeigt die resultierenden Einzelmodule, die über definierte Schnittstellen untereinander kommunizieren und deshalb leicht austauschbar sind.

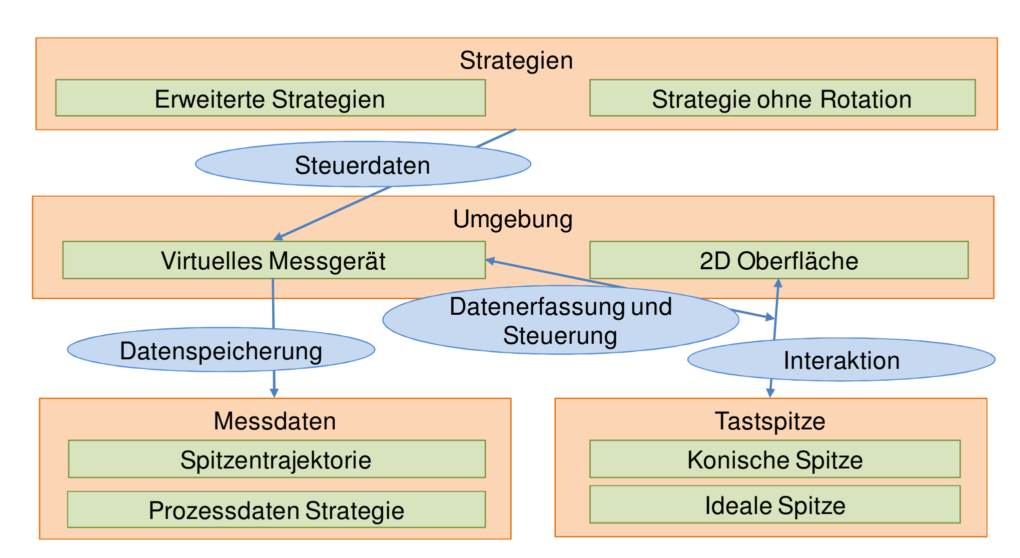


Bild 23: Vernetzte Module der Simulationsumgebung

Das Spitzenmodul enthält die geometrische Definition von Tastspitzen, dargestellt in einem jeweils eigenen Koordinatensystem. Der Benutzer konfiguriert und verwaltet Spitzen mit unterschiedlichen Krümmungsradien und Öffnungswinkeln. Eine ideale Spitze mit einem infinitesimal kleinen Krümmungsradius und Öffnungswinkel liefert zudem abweichungsbefreite Ergebnisse.

Geladene Spitzen werden im Modul Umgebung mit der geladenen diskretisierten 2D-Oberfläche in Verbindung gebracht. Hier greift die Komponente „Virtuelles Messgerät“ und setzt die in Abschnitt 4.1 umgesetzte Simulationslogik in Software um. Durch Verschiebungsvektoren und Rotationsmatrizen wird die Drehung der Spitzenmodelle realisiert und die iterative Scanbewegung sowie Kollisionskorrektur durchgeführt.

Eine Konfiguration der auszuführenden Messsequenz und insbesondere die zu wählenden Rotationswinkel werden durch den Block „Strategien“ definiert, der neben einer klassischen Messung ohne Rotation Algorithmen für Rotationsbewegungen enthält. Dieser Block wird in Kapitel 4.3 näher behandelt.

Während der simulierten Messung werden Systemzustände durch die Komponente „Datenerfassung“ für eine nachfolgende Auswertung aufgezeichnet. Diese umfassen unter anderem das erfasste Höhenprofil, Positionen und Winkel der Spitze sowie abgeleitete Größen wie Messabweichung, die auftretende Winkelgeschwindigkeit oder die resultierende Messdauer.

Zur Darstellung der Ergebnisse sind zwei grafische Darstellungsarten möglich. In der Hauptanwendung werden das Werkstück und die Tastnadel dargestellt. Die Position und die Neigung der Tastnadel kann zu jedem Oberflächenpunkt angezeigt werden. Zusätzlich kann farbcodiert das gemessene Profil überlagert werden. In einer zweiten Analyseumgebung werden die erfassten Größen über den Verlauf der Messung angezeigt, um tiefergehende Analysen durchzuführen und z.B. Korrelationen von Oberflächenstruktur und Systemzuständen zu identifizieren. Zudem ist ein Export für weitere Auswertungen mit z.B. Matlab möglich.

Ein zusätzliches Modul ist ein Oberflächengenerator. Dieser erlaubt die Erstellung künstlicher Oberflächen durch Aneinanderreihung von Krümmungen und Geraden. Wenn keine Oberflächendaten von realen Messungen genutzt werden sollen, können damit sämtliche relevante Testflächen generiert werden. Ein Beispiel ist in Bild 24 gezeigt, in Anlehnung an das Mikrokonturartefakt wie von der PTB bekannt, [PTB 2006].

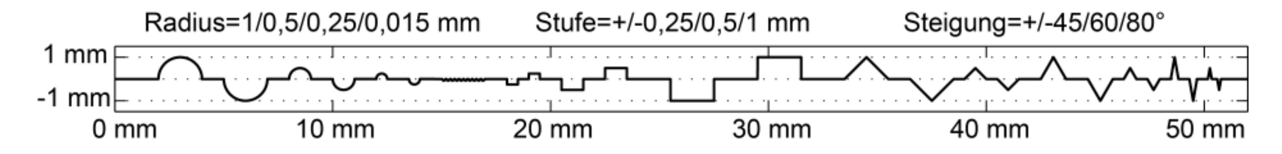


Bild 24: Beispieloberfläche im Simulator in Anlehnung an das Mikrokonturnormal

4.3 Strategien und Algorithmen

Neben der Möglichkeit, eine klassische Messung mit fest orientiertem Cantilever durchzuführen, ist eine Messung mittels des vorgeschlagenen Rotationsprinzips zu implementieren. Die Rotation wird während der Simulation vom Modul „virtuelles Messgerät“ durchgeführt, das den einzustellenden Winkel vom Modul Strategien erhält. In diesem Kontext soll „Strategie“ wie folgt verwendet werden: Verfahren und Methode zur Bestimmung eines geeigneten Antastwinkels für einen spezifischen Oberflächenpunkt. Strategien sind essentiell zur Durchführung der Rotation und bestimmen die Effektivität des Rotationsprinzips. Aus diesem Grund sollen mehrere Ansätze und Varianten entwickelt und implementiert werden.

Eine weitere Aufgabe der Strategien liegt im Einbezug und der Berücksichtigung von Grenzen einer späteren praktischen Realisierung. Im Hinblick auf die Planung des Prüfstandes müssen Einschränkungen von Rotationskinematiken berücksichtig werden. Diese umfassen begrenzte Drehwinkel, begrenzte Rotationsgeschwindigkeiten und Beschleunigung sowie einen minimalen Winkelschritt. Diese Einschränkungen müssen bei der Berechnung eines Rotationswinkels berücksichtigt werden.

Es sind prinzipiell mehrere Ansätze für Strategien denkbar, die sich in die Klassen „Wissensbasiert“, „Analysierend“, „Vorhersagend“ und „Kombiniert“ einteilen lassen.

- Wissensbasierte Strategien bedingen konkretes Vorwissen um das Werkstück, z.B. ein CAD-Modell oder eine schon existierende Messung mit einem beliebigen Messgerät. Nach Kompensation eines eventuellen Offsets kann der ideale Drehwinkel geplant werden und die Messung in einem Durchlauf durchgeführt werden.

- Analysierende Strategien erstellen die benötigte Datenbasis zur Winkelberechnung durch einen Vorab-Scan mit dem Messgerät selbst. Dieser erste Scan erfolgt ohne eine Neigung und liefert die Kalkulationsbasis gleich im Gerätekoordinatensystem. In einem zweiten Durchlauf erfolgt eine Messung mit Nachführung. Dieses Verfahren benötigt ca. die doppelte Messdauer und die Datenbasis ist abweichungsbehaftet, jedoch ist kein exaktes Vorwissen notwendig.

- Eine weitere Variante sind vorhersagende Strategien, die mit nur einem Messdurchgang und ohne Vorwissen arbeiten. Nach Start der Messung wird auf Basis der erfassten Oberflächenpunkte die momentane Oberflächenneigung bestimmt und die

nächsten Punkte extrapoliert. Die auftretenden Abweichungen hängen hier von der Qualität der Extrapolation und der Geschwindigkeit der Anpassung ab.

- Ein letzter Ansatz besteht aus der Kombination mehrerer Klassen. Beispielsweise wäre ein Vorab-Scan denkbar mit einer vorhersagenden Strategie, dessen Ergebnis die Eingangsgröße einer analysierenden Strategie ist.

Jede Strategieklasse kann durch unterschiedliche Algorithmen implementiert werden. Ein Überblick der realisierten Varianten ist in Tabelle 1 dargestellt. Im Folgenden soll auf die einzelnen Strategien näher eingegangen werden.

Strategie	**Varianten**
Wissensbasiert	- Trivial (tangentenbasiert) - Trend-orientiert trivial (Schutz vor hochfrequenten Profiländerungen)
Analysierend	- Trivial - Trend-orientiert trivial - Average-Slope (regional optimierter Winkel)
Vorhersagend	Extrapolationsalgorithmen: - Linear - Newton - Lagrange - Aitken-Neville - Hermite
Kombiniert	Kombination obiger Varianten

Tabelle 1: Realisierte Strategien und Varianten

Wissensbasierte Strategien

Die als „triviale Strategie“ bezeichnete Winkelberechnung ist der offensichtlichste Ansatz und basiert auf der Tangentenberechnung an einem Oberflächenpunkt. Sei $P_i(x,z)$ der zu messende Oberflächenpunkt und $f_{Stra}(P_i)$ der von der Strategie berechnete Antastwinkel. So ergibt sich für den Fall einer kontinuierlichen Oberflächenrepräsentation:

$$f_{Stra}(P_i) = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{df_{P_i}(x_i)}{dx} \tag{16}$$

Zur Nutzung auf Basis der diskreten Oberflächendaten und der Implementierung in einen Digitalrechner ist eine diskrete Darstellung nach (17) notwendig:

$$f_{Stra}(P_i) = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{(z_i - z_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} \tag{17}$$

Diese liefert, dargestellt in Bild 25 den Tangentialwinkel zum Punkt P_i über P_i und P_{i-1}. Mittels einer Addition von $\pi/2$ ergibt sich der notwendige Winkel der Tastspitze.

Eine Variation dieses Verfahrens, die wissensbasierte trend-orientierte triviale Strategie, berücksichtigt zusätzlich hochfrequente Profiländerungen, die für die Rotationskinematik zu schnell wären. Solche Profile würden bei begrenzter Geschwindigkeit eine Ausrichtung auf einen optimalen Mittelwert verhindern. Durch Berechnung des mittleren Tangentialwinkels über ein vorausblickendes Betrachtungsintervall der Breite B kann eine Rotation vom optimalen Winkel weg gesperrt werden.

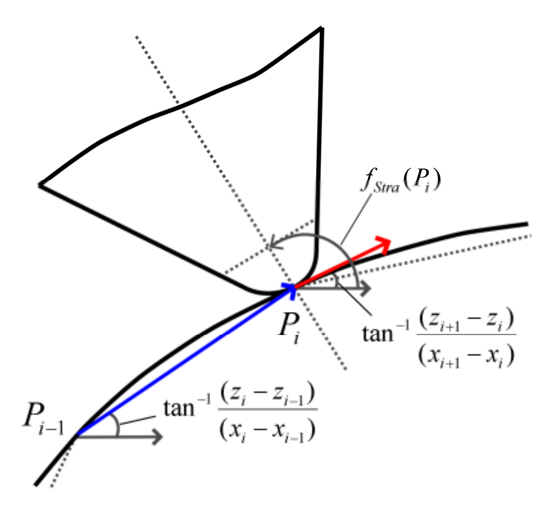


Bild 25: Diskrete Berechnung der Oberflächennormalen

Analysierende Strategien

Beide beschriebenen Algorithmen können auch bei den analysierenden Strategien zum Einsatz kommen, nachdem der Vorab-Scan ohne Rotation das Basisprofil generiert hat. Es wurde in dieser Klasse eine zusätzliche Abwandlung realisiert, die im Gegensatz zu der trend-orientierten trivialen Strategie direkt den mittleren Oberflächenwinkel des Betrachtungsintervalls nutzt. Dieser „Average-Slope“ Ansatz filtert Rauschen und hochfrequente Anteile wie Rauheit und zu kleine Strukturen. Gegenüber dem trend-orientierten Ansatz wird die Rotation schon vor einer Profiländerung mit einem regional optimierten Winkel eingeleitet.

$$\mathrm{f}_{\mathrm{Stra}}(P_i)=\frac{\pi}{2}+\tan^{-1}\left(\frac{1}{B}\sum_{k=0}^{B}\frac{(z'_{i+k}-z'_{i+k-1})}{(x'_{i+k}-x'_{i+k-1})}\right) \qquad (18)$$

Vorhersagende Strategien

Es bleibt die Klasse der vorhersagenden Strategien. Die Messung wird mit einem festen Antastwinkel, beispielsweise senkrecht zum Werkstück gestartet und Punkt für Punkt Messwerte ohne Rotation aufgezeichnet. Die Oberflächenwerte werden in einen Puffer geschrieben, bis eine Mindestanzahl an Werten vorliegt. Diese Werte können gefiltert werden, um Rauschen und hochfrequente Änderungen zu reduzieren. Eine Filterung kann durch die Modularisierung des Simulators über beliebige Funktionen realisiert werden. Wenn ausreichend Daten vorliegen, wird über diese erfassten Stützpunkte eine lokal gültige Oberflächenfunktion eingepasst und zukünftige Werte extrapoliert. Mit Kenntnis dieser Funktion bzw. dieser Daten kann mit bereits gezeigten Methoden der nächste Rotationswinkel berechnet werden. Nach der Rotation werden erneut Messwerte in den Puffer geschrieben und die Berechnung laufend wiederholt. In der Simulationsumgebung wurde eine Extrapolation auf Basis der folgenden Algorithmen implementiert: [BRONSTEIN 2008]

- Lineare Interpolation (Polynom ersten Grades)
- Newton (Polynom höheren Grades)
- Lagrange
- Aitken-Neville
- Hermite

Die Algorithmen unterscheiden sich in ihrem Grad und dem verwendeten Ansatz. Beispielsweise arbeitet die lineare Interpolation mit einem Polynom von nur erster Ordnung im Vergleich zum Newton Verfahren, das sich durch eine Ordnung größer zwei auszeichnet. Das Hermite Verfahren arbeitet ähnlich, bei der resultierenden Funktion wird aber zusätzlich noch die Steigung der Stützpunkte berücksichtigt. Im Gegensatz zu den restlichen Verfahren berechnet der Aitken-Neville Algorithmus nicht eine Ersatzfunktion zu den Stützstellen, sondern liefert direkt den nächsten Oberflächenpunkt.

Je nachdem, ob eine Ersatzfunktion $F(x_i)$ oder direkt der nächste Punkt berechnet wurde, kann der Antastwinkel nach Gleichung (19) berechnet werden.

$$f_{Stra}(P_i) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\frac{dF(x_i)}{dx} \; falls\ F(x_i)\ vorhergesagt\ worden\ ist \\ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\frac{(z_i - z_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} \; falls\ direkt\ der\ Punkt\ P_i = (x_i, z_i)\ resultiert \end{cases} \tag{19}$$

Für die Extrapolation kann jeweils die Breite der zu Grunde liegenden Daten gewählt werden. Sie sollte profilabhängig dimensioniert werden, so dass nur die aktuelle Oberflächenveränderung erfasst wird, ohne diese mit bereits erfassten Strukturen zu vermischen. Dadurch, dass vorhersagende Strategien ihre Berechnung auf abweichungsbehafteten Daten durchführen, wird unter Umständen ein idealer Winkel nicht sofort erreicht, bis durch die kontinuierliche Abweichungsreduktion ein idealer Kontaktwinkel folgt. Jedoch benötigt dieses Verfahren durch nur einen Durchgang am wenigsten Zeit und ist gegenüber kurzzeitigen Veränderungen der Oberfläche, wie thermischen Effekten, am robustesten.

4.4 Ergebnisse Teil 1: Simulative Bewertung des Rotationsverfahrens

4.4.1 Teststrukturen

Zur Untersuchung der Effektivität der Strategien und des Rotationsprinzips insgesamt wurden Simulationsdurchgänge in einem Versuchsplan auf repräsentativen Testoberflächen durchgeführt. Primäre Eingangsparameter der Untersuchungen waren neben den Oberflächen Spitzenwinkel, Spitzenradius, maximaler Drehwinkel und Drehgeschwindigkeit. Auswertekriterien für die Simulationsreihen waren Messabweichung, idealer und begrenzter Drehwinkel, Drehgeschwindigkeit- und -beschleunigung, Zeit zur Erreichung des optimalen Winkels, Messdauer, Flankenkollisionen und Aufschwingverhalten. Diese Daten wurden mit der Analyseumgebung erfasst.

Teststruktur Halbkreis

Eine erste Testoberfläche besteht aus einem Kreisprofil in einer Ebene, wie es in der Praxis beispielsweise in optischen Linsen und Mikrolinsen vorkommt. Es wurde ein Radius von 0,5 mm gewählt und der Mittelpunkt ist um 0,08 mm in die Basisebene eingelassen. Die erfassbare Kreisoberfläche deckt damit einen Winkelbereich von -80° bis +80° ab und zeichnet sich durch eine kontinuierliche und monotone Steigungsänderung aus, vom Übergang zum ebenen Basisprofil abgesehen. Durch dieses vorhersagbare Verhalten ergeben sich wenige Unterschiede zwischen den Strategien, welche in später in diesem Kapitel näher behandelt werden. Repräsentativ soll deshalb in Bild 26 eine vorhersagende Strategie mit linearer Extrapolation mit einem regulären Scan ohne Rotation verglichen werden. Als Testparameter wurde eine Spitze mit dem Radius 10 µm und einem Öffnungswinkel 60° gewählt. Der maxi-

male Rotationswinkel wurde auf ± 45° festgelegt bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 1 °/s. Bild 26 zeigt das erfasste Profil für beide Varianten, auftretende Abweichungen zum tatsächlichen Profil sowie den eingestellten Drehwinkel samt ideal notwendigem Winkel.

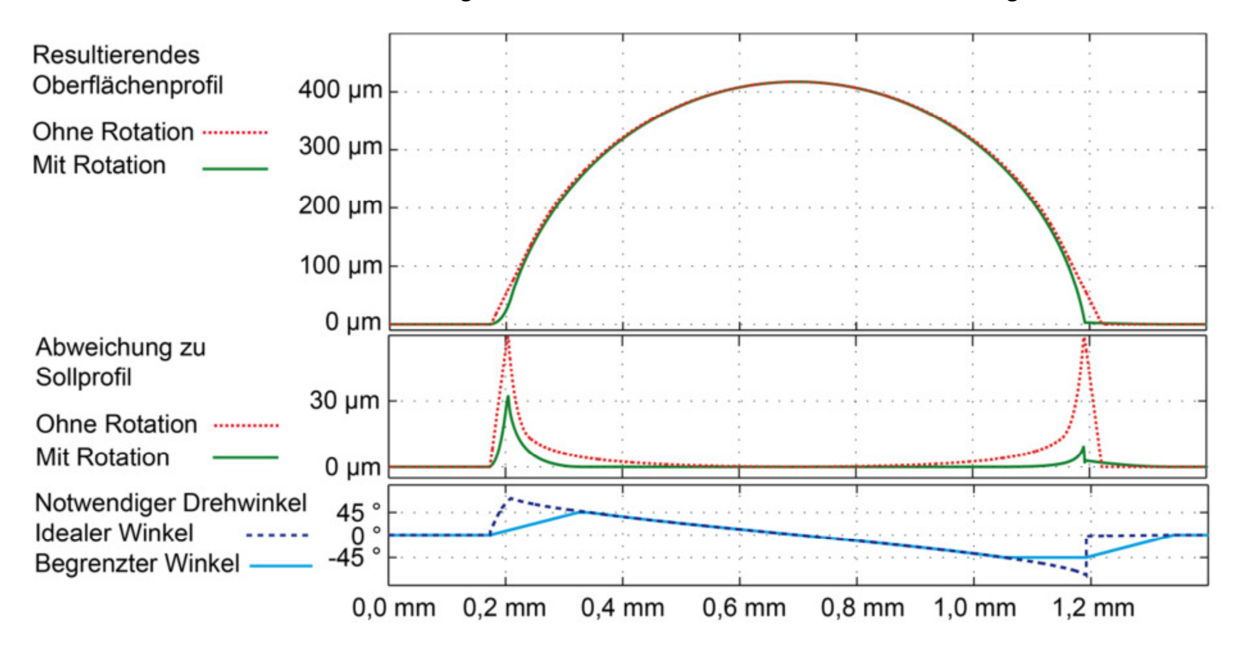


Bild 26: Simulierte Messung mit Sensorrotation auf einem Kreisprofil

Mit Beginn der Messung ist beim klassischen Ansatz sowie bei der vorhersagenden Strategie keine Rotation eingestellt und die Tastspitze ist senkrecht zum Basisprofil. Mit fortschreitender Messung erfolgt eine Flankenantastung am Beginn der Halbsphäre und die Abweichung an dieser abrupten Höhenänderung steigt für beide Varianten. Die erfasste Höhenänderung wird in den Berechnungspuffer der vorhersagenden Strategie geschrieben, eine notwendige Winkeländerung berechnet und eine Rotation wird eingeleitet. Durch eine begrenzte Rotationsgeschwindigkeit und begrenzten maximalen Winkel, sichtbar am Unterschied zwischen tatsächlichem und idealem Winkel, wird die Abweichung jedoch nicht komplett abgebaut. Der Anstieg erfolgt jedoch langsamer und das Maximum wird in diesem Fall von 60 µm auf 30 µm reduziert. Mit fortschreitender Messung wird die Abweichung weiter reduziert und der Rotationswinkel erreicht seinen eingestellten Maximalwert. Mit Verlassen der Stellbegrenzung wird nun die Abweichung, im Gegensatz zum klassischen Verfahren, komplett verhindert. Bei der Messung auf der zweiten Kreishälfte steigt die Abweichung beim Rotationsverfahren erst bei Erreichen der Stellbegrenzung an, jedoch, durch die geeignete Vorausrichtung, führt der abrupte Steigungswechsel nur zu einer schwachen Flankenkollision. Im Vergleich zum klassischen Verfahren kann hier durch Rotation die maximale Messabweichung auf 20 % reduziert werden, nur begrenzt durch Drehgeschwindigkeit und Drehwinkel. Bei einer analysierenden Strategie würde sich dieses Verhalten auch zu Beginn des Kreisprofils zeigen. Bei Betrachtung des resultierenden Profils im Bereich des Kontaktwinkels von -45° bis +45° verhindert das Rotationsprinzip die Abweichung komplett.

Die simulierte Begrenzung des Drehwinkels dient der Bewertung von unterschiedlichen Kinematiken in der Hardwareplanung, da sich diese durch ihren erreichbaren Drehwinkel unterscheiden. Der bereits gezeigte Halbkreis von -80° bis +80° erfordert einen großen Drehbereich. An diesem Beispiel soll der Effekt der Drehwinkelbegrenzung dargestellt werden. Betrachtet wurde die zweite Kreishälfte, um den Effekt einer langsamen Rotation zu unterdrücken. Bild 27 zeigt die mittlere Abweichung sowie das Maximum über den Winkelbereich von 0° bis 45°. Beide sind normiert auf eine klassische Messung mit einer mittleren Abweichung

von 20,7 µm und dem rechnerischen Maximum von 59,2 µm. Schon eine Rotation um einen geringen Winkel führt zu einer sichtbaren Abweichungsreduktion, ± 10° würde in diesem Testfall die maximale und mittlere Abweichung um 50% reduzieren.

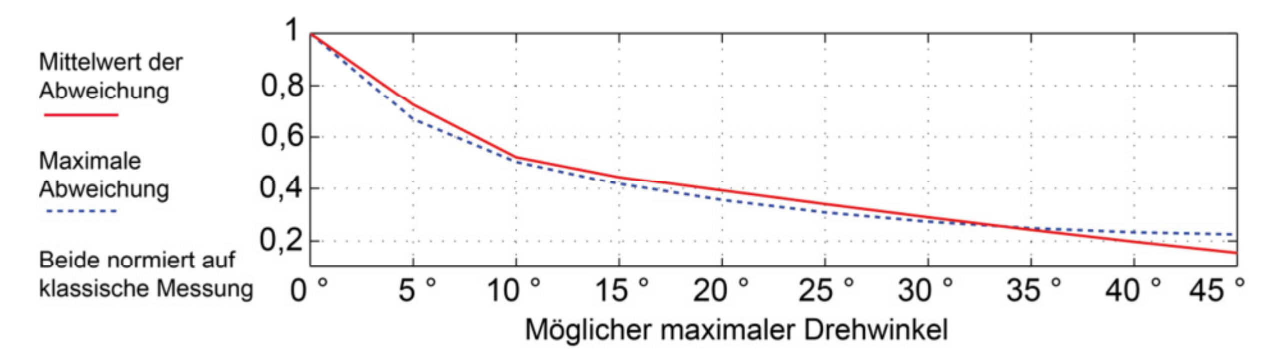


Bild 27: Abweichungsreduktion mit steigendem maximalem Drehwinkel

Teststruktur Rampe

Eine zweite Testoberfläche betrachtet den Übergang zwischen zwei konstanten Steigungen, wie sie z.B. bei funktionalen Oberflächen wie Riblets oder auch bei MEMS mit senkrechten Strukturen vorkommen. In diesem Testszenario wird der spontane Übergang zwischen der Basisebene und einer Rampe mit 18° Steigung dargestellt. Die Simulationsparameter wurden wie bei der Kugel gewählt, jedoch mit einem ausreichenden Maximalwinkel von 20°. Schwerpunkt dieses Testfalls ist die Reaktion der verschiedenen Strategien auf die Steigungsänderung. Bei diesem gering gewählten Winkel erfolgt ein Kontakt nur im sphärischen Teil der Tastspitze ohne Flankenkontakt.

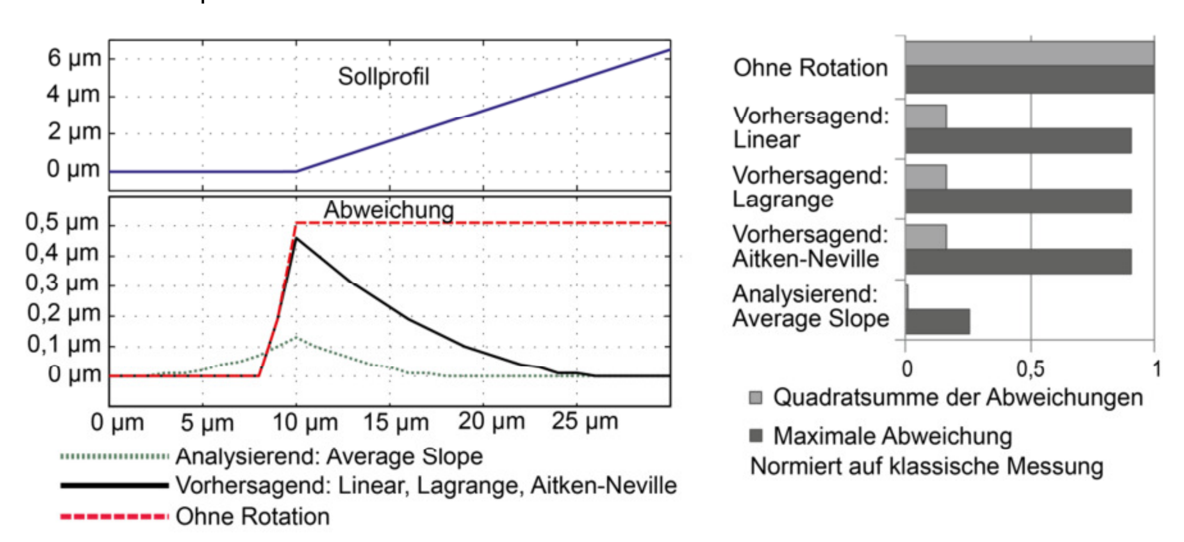


Bild 28: Simulierte Messung mit Sensorrotation: Rampenstruktur mit verschiedenen Strategien

Bild 28 links zeigt die auftretenden Abweichungen für einen klassischen Scan, für verschiedene vorhersagende Strategien sowie eine analysierende Strategie. Ein Scan ohne Rotation führt in diesem Szenario zu einer konstanten Abweichung von 0,51 µm durch den Kontakt leicht neben dem Referenzpunkt. An dieser Stelle könnte beispielsweise eine rechnerische Kompensation der Spitzenform erfolgen. Wieder normiert auf die klassische Messung wird in Bild 28 rechts die Quadratsumme der Abweichungen sowie das Maximum dargestellt. Wie schon beim Kreisprofil reagieren alle vorhersagenden Strategien auf die Änderung im Hö-

henprofil und bauen die Abweichung Schritt für Schritt durch Rotation ab. Im gewählten Szenario reagieren alle Algorithmen vergleichbar gut, begrenzt durch die Rotationsgeschwindigkeit. Im Vergleich zeigen analysierende Strategien die besten Resultate. Durch Initiierung der Rotation vor dem Übergang kann die Abweichung minimiert werden, nur noch durch die Unzugänglichkeit der Ecke durch die Spitze begrenzt. Die frühzeitige Rotation führt im Vergleich zu den anderen Ansätzen jedoch zu einem zusätzlichen Abweichungsanteil vor dem Übergang. Die analysierende Strategie kann im Testfall die Abweichung von maximal 0,51 µm auf 0,13 µm reduzieren.

Teststruktur Sinusprofil

Ergänzend zur konstanten Krümmung und der sprunghaften Veränderung stellt eine dritte Testoberfläche eine kontinuierliche Krümmungsänderung in Form eines Sinusprofils dar. Es wurde eine Periodenlänge von 600 µm bei einer Amplitude von 150 µm gewählt, erneut mit einer Ebene als Startposition. Der notwendige Richtungswechsel bei der Rotation soll ein eventuell auftretendes Schwingungsverhalten aufzeigen. Für die Spitzenkonfiguration wurde erneut ein 10 µm Radius, 60° Öffnungswinkel und ein maximaler Winkel von 20° gewählt. Bei diesem Winkel wird eine Flankenkollision vermieden. Bild 29 links zeigt die verbleibende Abweichung bei einer linear vorhersagenden Strategie und Bild 29 rechts zeigt erneut einen statistischen Vergleich mehrerer Strategien, normiert auf eine klassische Messung. Alle Ansätze arbeiten sehr vergleichbar und bis auf den Steigungssprung am Anfang haben analysierende Strategien keinen nennenswerten Vorteil. Alle Strategien folgen mit der Rotation der Oberflächensteigung und können eine auftretende Messabweichung erfolgreich kompensieren, solange sie nicht in die Stellbegrenzung geraten. Es ergibt sich über die gesamte Oberfläche eine Reduktion der quadratischen Abweichung um 82 %. Durch die Unzugänglichkeit des Übergangs der Startebene zum Sinusprofil kann die maximal auftretende Abweichung nur von 8,6 µm auf 7,3 µm reduziert werden, im Profil wird sie von 8,6 µm auf 3,9 µm gesenkt.

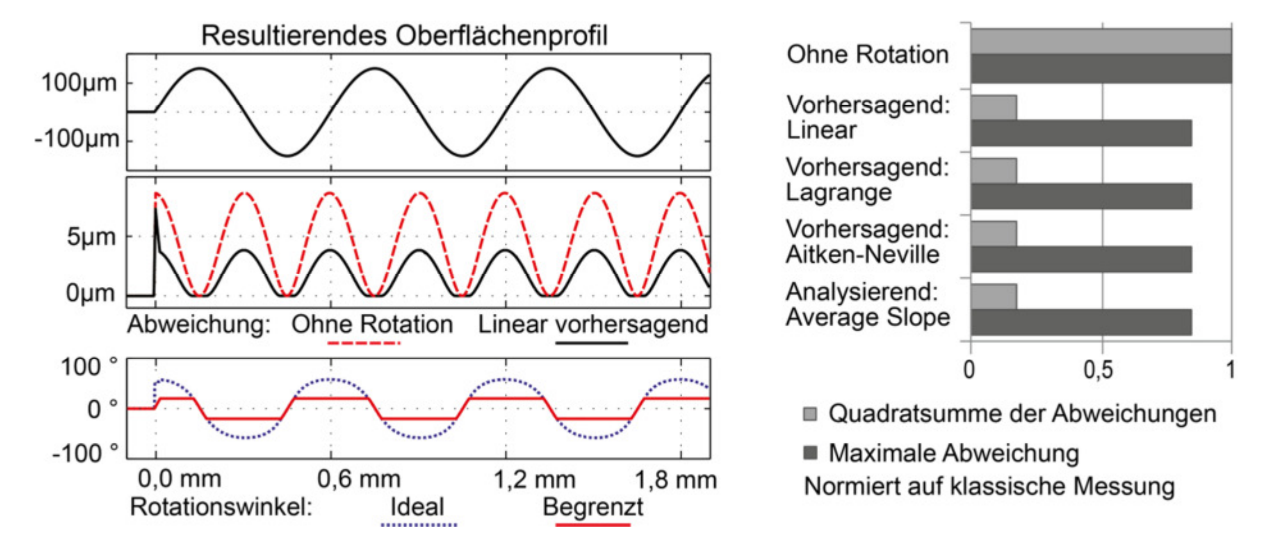


Bild 29: Links: Simulierte Messung mit Sensorrotation auf einem Sinusprofil mit linear vorhersagender Strategie. Rechts: Statistischer Vergleich verschiedener Strategien

4.4.2 Nebeneffekte und Sonderfälle

Neben den statistischen Ergebnissen auf den Testoberflächen wurden während der Simulation zu berücksichtigende Nebeneffekte identifiziert sowie Sonderfälle betrachtet.

Flankenkollision

Bei der gezeigten sinusoidalen Oberfläche wurde der maximale Rotationswinkel begrenzt, um Flankenkollisionen zu vermeiden. Falls dies nicht geschieht, bzw. Kollisionen ungeplant auftreten, können durch die Strategien suboptimale Winkel berechnet werden oder eine Oszillation auftreten. Das Sinusprofil wurde erneut simuliert, diesmal mit nun einem zu hohen Rotationswinkel von 45° und einer wissensbasierten trivialen Strategie, d.h. die Neigung wird nur auf Basis des Idealprofils berechnet und tatsächliche Abweichungen werden nicht berücksichtigt. Bild 30 zeigt hierzu grafische Ergebnisse direkt aus der Simulationsumgebung, mit farblich codierter Abweichung (grün <= 1 µm, gelb <= 5 µm, rot > 5 µm) und schwarz das zu erfassende Profil.

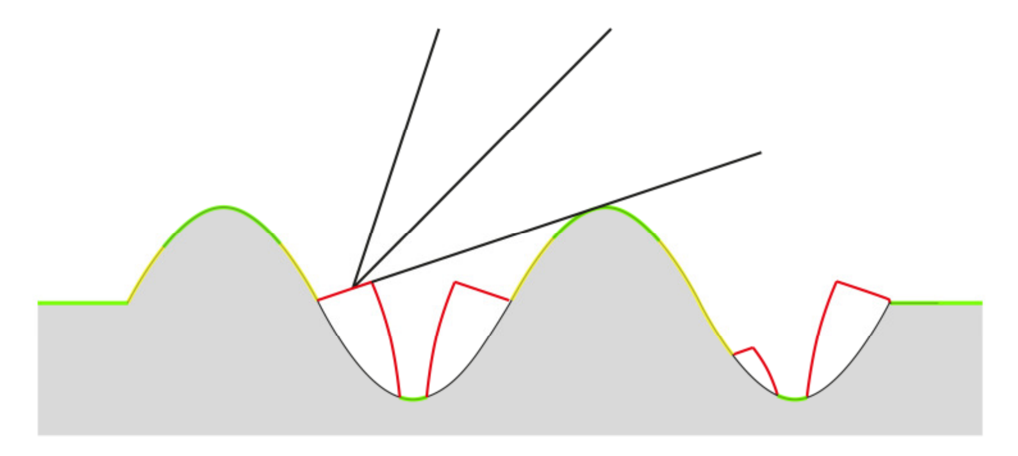


Bild 30: Flankenkollision bei wissensbasierten Strategien

Am ersten Maximum des Profils ist die Abweichung minimal und die Spitze folgt der Oberfläche konstant in einem rechten Winkel. Mit Erreichen der Stellbegrenzung von 45° steigt die Abweichung leicht an, bis sich plötzlich ein Flankenkontakt am nächsten Maximum ereignet. Die resultierende Abweichung steigt an bis, durch die umkehrende Oberflächenneigung ausgelöst, die Spitze wieder dreht und im Minimum wieder eine definierte Kontaktsituation herrscht. In diesem Szenario wäre ein Kompromiss durch Ermittlung des lokal maximal zulässigen Antastwinkels ohne Kollision und Inkaufnahme einer leichten Auswanderung des Kontaktpunktes notwendig. Dieses Verhalten wurde jedoch nicht nur bei wissensbasierten und analysierenden Strategien betrachtet, sondern auch bei vorhersagenden. Hier tritt dieser Effekt auf, falls der Vorhersagepuffer zu groß gewählt wurde und die letzten Punkte mit abweichender Höhe nicht genug Gewicht in der Interpolation erlangen.

Andererseits wurde bei einem Interpolationspuffer von zu geringer Breite ein instabiler, oszillierender Systemzustand beobachtet, dargestellt in Bild 31 links. Mit Auftreten der ersten Flankenkollision ist ein plötzlicher Höhenanstieg verbunden, der wiederum in der Strategie eine Rotation nach links auslöst. Hierdurch wandert der Kontaktpunkt auf der Flanke und die Abweichung wird verringert. Wenn bei der Berechnung des nächsten Winkels hauptsächlich die letzten fallenden Punkte berücksichtigt werden, wird nun fälschlicherweise eine Rotation nach rechts ausgelöst, was die Situation verschlimmert und zu einer Oszillation der Spitzenrotation führt, bis ein normaler Kontaktzustand wiederhergestellt ist. Damit ist die Berech-

nungsbreite mit Sorgfalt zu wählen bzw. die Berechnungen mit mehreren Breiten durchzuführen und gewichtet zu kombinieren. Ein komplexeres Optimierungsproblem liegt zudem vor, wenn die Oberfläche von der Profilometerspitze nicht mehr komplett erfasst werden kann, beispielsweise bei MEMS Strukturen von zu geringer Breite und zu hohen Aspektverhältnissen, Bild 31 rechts. Der Flankenkontakt liefert bei allen verwendeten Strategien ungünstige Ergebnisse und eine oberflächenspezifische Konfiguration durch den Bediener ist notwendig.

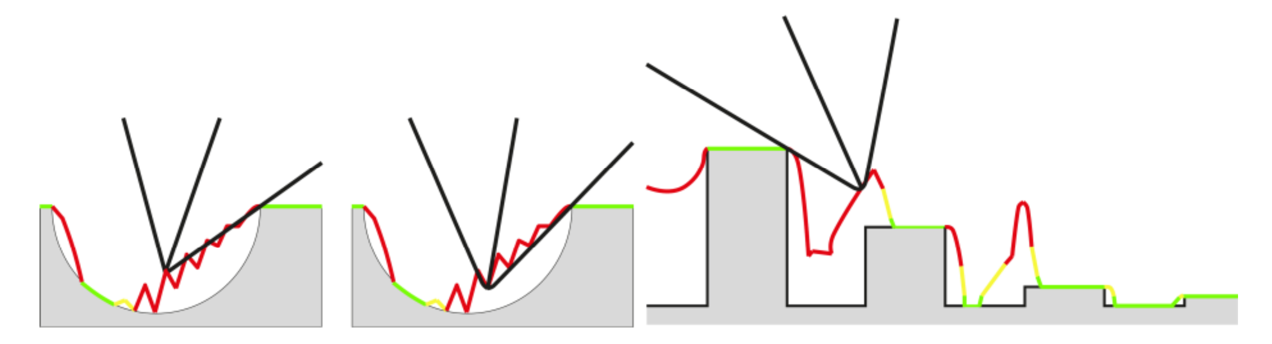


Bild 31: Links: Aufschwingen der Rotation. Rechts: Unzugänglichkeit des Profils

Große Spitzen

Eine Sonderkonfiguration der Simulation waren für die Profilometrie besonders große Tastspitzen. Sie können bei besonders weichen Werkstoffen genutzt werden bzw. sind bei mikrotaktilen Sensoren Stand der Technik. Bei ihnen ist der Abweichungseffekt durch Auswanderung vom Spitzenpol besonders deutlich. Bild 32 zeigt die Simulation auf einem Sinusprofil der Periodenlänge 2 mm und einer Amplitude von 250 µm. Die Spitze hingegen hat einen Radius von 150 µm bei 60° Öffnungswinkel. Neben der rotierten Messung ist auch eine klassische Messung überlagert. Durch Rotation kann in diesem Fall die Messabweichung von maximal 40,5 µm auf null reduziert werden, abgesehen von der unzugänglichen Stelle beim Übergang von Ebene zu Sinusprofil. Für den gezeigten Fall erlaubt die Rotation die Nutzung einer größeren Spitze, ohne dass Abweichungen entstehen, jedoch bei Abstrichen in der lateralen Auflösung.

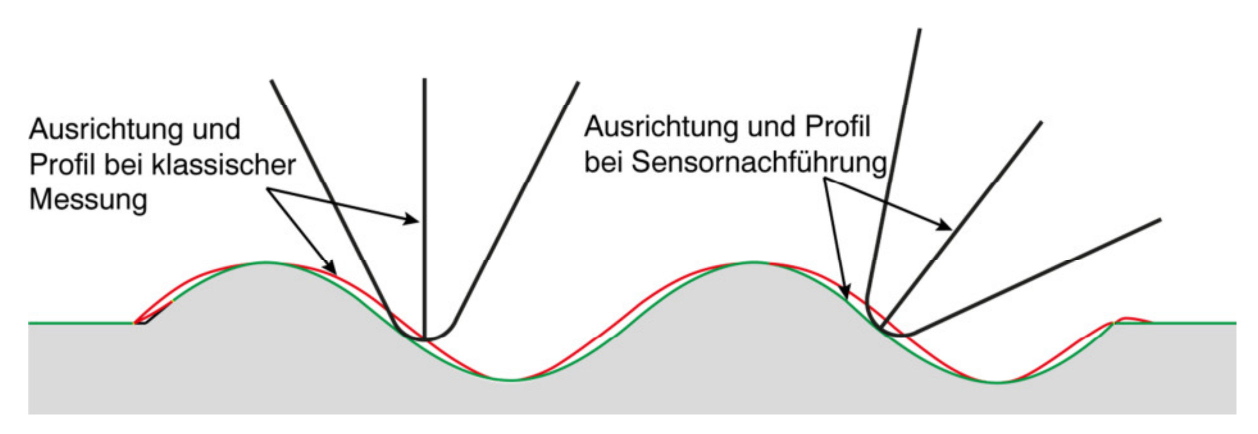


Bild 32: Simulation des Rotationsprinzips mit großen Spitzen

4.4.3 Bewertung des Rotationsprinzips auf Basis der Simulation

Das vorgeschlagene dynamische Rotationsprinzip konnte erfolgreich in eine Simulationslogik übersetzt werden und in einer Simulationsumgebung realisiert werden. Zur Durchführung des Prinzips wurden zur Bestimmung eines Rotationswinkels für einen Oberflächenpunkt mehrere Strategien samt Algorithmen entwickelt. Simulationsreihen auf den Testoberflächen zeigen den Nutzen des Rotationsverfahrens in vielfältigen Situationen durch Reduktion der auftretenden Abweichung und Erweiterung des akzeptablen Oberflächenwinkels. Bei einem Vergleich der entwickelten Strategien ist der Hauptunterschied zwischen den wissensbasierten respektive analysierenden Ansätzen und den vorhersagenden Ansätzen sichtbar, jedoch abhängig von Struktur oft gering oder vernachlässigbar. Die Unterschiede zeigen sich erst bei Variation der Spitzenform, den maximalen Drehwinkeln und Drehgeschwindigkeiten. Feinere Unterschiede ergeben sich in der berechneten Winkelbeschleunigung, dem zeitlichen Vorlauf der Reaktion auf eine Oberflächenänderung und der Tendenz zum Aufschwingen. Alle vorhersagenden Strategien außer der linearen Interpolation können bei ungünstiger Parameterwahl zum Aufschwingen neigen. Für die Praxis hat sich deshalb eine vorhersagende lineare Strategie bewährt. Diese liefert in nur einem Durchgang Ergebnisse, die den anderen Ansätzen in der Regel nicht nachstehen, und lässt sich zudem mit wenig Rechenaufwand im späteren Versuchsstand realisieren. Ein deutlicher Unterschied zu anderen eingebundenen Extrapolationsalgorithmen wurde nicht festgestellt. Zu berücksichtigen bei der Wahl der Strategie sind wiederholte oder hohe Steigungssprünge. Diese ließen sich mit einer analysierenden Strategie und dem vorausblickenden Average-Slope Ansatz in zwei Durchgängen besser erfassen als mit einer linearen Vorhersage. Die wissensbasierten Strategien wurden in den Simulationen nicht in vollem Detailgrad betrachtet, sie sind jedoch mit analysierenden Strategien vergleichbar.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen die – je nach Profilverlauf und Tastelement – z.T. erheblichen zu erwartenden Verbesserungen der Abbildungstreue durch die Sensornachführung, sowie die Bereiche der Messobjekte in welchen die Sensornachführung besonders nutzbringend ist. Der erfassbare Winkelbereich des simulierten Profilometers steigt je nach Kinematik deutlich an und die Messabweichung durch den Oberflächenwinkel wird verhindert, der Sensor ist während der Messung in seinem optimalen Arbeitswinkel. Schon eine mögliche Drehung von 10° senkt die Messabweichung um 50%. Die simulativ nachgewiesene Effektivität der Messabweichungsreduktion und der Steigerung des erfassbaren Winkelbereichs schließen die Voruntersuchungen zum Rotationsprinzip ab und machen den Weg frei für eine praktische Umsetzung.

5 Planung der prototypischen Realisierung

Mit erfolgreichem Abschluss der Simulationen des Rotationsprinzips gilt es, die erprobte Theorie in die Praxis umzusetzen. Zur Durchführung dieses Vorhabens sind mehrere Komponenten notwendig, die sich in die folgenden Felder unterteilen lassen:

- Nanopositioniergerät: Basis des Prototyps, Durchführung der Scanbewegung
- Rotationskinematik: Durchführung der Sensorrotation
- Sensor: Erfassung der Oberfläche, bewegt durch Rotationskinematik
- Prüfkörper: Kalibrierte Struktur zur Validierung des Rotationsprinzips

Diese Komponenten sind zu planen, auszuwählen und miteinander zu integrieren auf mechanischer Ebene, elektrischer Ebene und informationstechnischer Ebene.

5.1 Nanokoordinatenmessgerät NMM-1

Als technische Basis des Vorhabens soll eine Nanopositioniereinrichtung zum Einsatz kommen. Diese führt die laterale Scanbewegung zwischen Werkstück und Sensor aus und passt die Höhenposition an. In diesem Vorhaben soll als Positioniereinheit auf das Nanopositioniergerät NMM-1 der Firma SIOS Meßtechnik GmbH zurückgegriffen werden. Dieses fällt in die Klasse der Nanokoordinatenmessgeräte und erlaubt einen Mess- und Positionierbereich von 25 mm x 25 mm x 5 mm bei einer Auflösung der laserinterferometrischen Achsmesssysteme von 0,1 nm mit einer Unsicherheit von 3 nm [JÄGER U.A. 2009]. Das Gerät wird seit 1995 an der Technischen Universität Ilmenau am Institut für Prozeßmeß- und Sensortechnik in Zusammenarbeit mit der Firma SIOS Meßtechnik GmbH entwickelt [HAUSOTTE 2002]. Das Gerät ist in kontinuierlicher Weiterentwicklung und die Neuerungen wurden bei wiederholter Modernisierung in das am Lehrstuhl QFM existierende Exemplar übertragen.

Das Gerät lässt sich in seine Hauptkomponenten Positioniereinheit und Elektronikeinheit untergliedern. Die Elektronikeinheit beinhaltet neben dem Digitalen Signalprozessor (DSP), der alle Echtzeitberechnungen inklusive Positionsregelung ausführt, alle Komponenten, die Wärme abgeben. Dies umfasst frequenzstabilisierte He-Ne-Laserquellen für drei Bewegungsachsen, die die Rückführbarkeit der mit dem Gerät erhaltenen Messergebnisse sicherstellen. Eine weitere Komponente stellen die Leistungstreiber für die elektromagnetischen Achsantriebe dar. Zur Ansteuerung kommt ein regulärer Personal Computer zum Einsatz, der über USB mit dem DSP verbunden ist. Über Gerätekommandos lassen sich alle Konfigurationen vornehmen und Messbefehle absetzen. Als Benutzerschnittstelle wird dazu die skriptbasierte Entwicklungsumgebung Matlab von Mathworks eingesetzt oder eine vereinfachte grafische Oberfläche NMMControl. Die Positioniereinheit der NMM-1 ist in einer akustischen Abschirmhaube untergebracht und steht auf einer Granitplatte, die auf einem pneumatischen Schwingungsdämpfertisch liegt [HOFFMANN 2009]. Kern der Positioniereinheit ist der Werkstückträger aus der Glaskeramik Zerodur mit drei verspiegelten Außenflächen. Zerodur trägt mit seinem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $0 \pm 0{,}10 \times 10^{-6}$/K zur Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen bei. Die Außenflächen sind Teil dreier Laserinterferometer, die von den Laserquellen in der Elektronikeinheit gespeist werden. Bei einer imaginären Verlängerung der Laserstrahlen durch die Außenflächen hindurch wird sichtbar, dass sich die Strahlen in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Dieser Punkt ist zudem der Arbeitspunkt des ausgewählten Sensors, der fest unterhalb der Kopfplatte installiert wird.

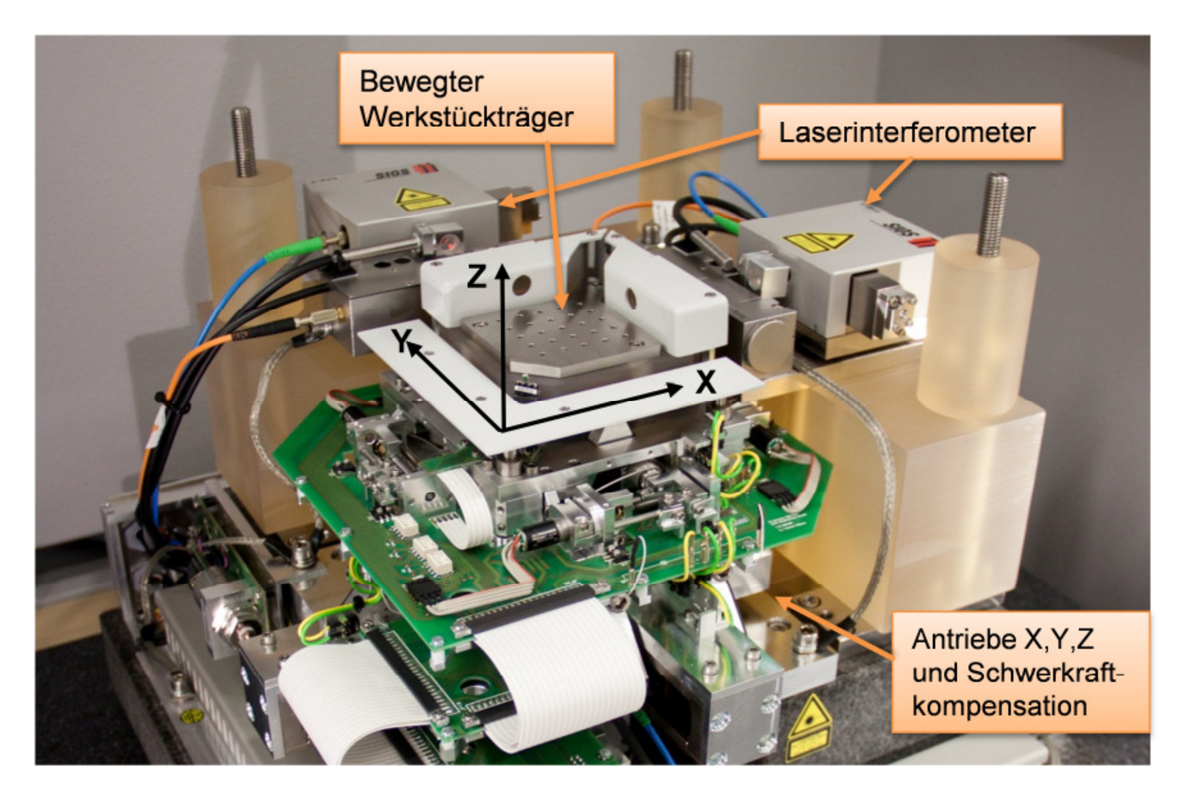


Bild 33: Nanomessgerät NMM-1: Positioniereinheit mit abgenommener Kopfplatte und Sensor

Dieser fluchtende Aufbau der zu messenden Größe mit den Wegmesssystemen eliminiert den Abbe Fehler erster Ordnung [HAUSOTTE 2002] und ist ein weiterer notwendiger Schritt um die erzielte Genauigkeit zu erreichen. In diesem Aufbau wird nur das Werkstück samt der Spiegelecke bewegt, die von drei gestapelten elektromagnetischen Linearantrieben getragen wird. Der Sensor ist unbewegt unter der Kopfplatte. Längenmesssysteme und Sensorik sind Teil des Metrologierahmens, der vom Geräterahmen mit den Antrieben getrennt ist.

Weitere Maßnahmen zur Reduktion von Umwelteinflüssen wurden auf Seiten des Lehrstuhls QFM durchgeführt durch Betrieb der NMM-1 in einem klimageregelten und schwingungsisolierten Messraum. Der Messraum ist mit einem separaten schwingungsgedämpftem Fundament vom Rest des Gebäudes getrennt, um Gebäudeschwingungen zu entkoppeln. Die Klimatechnik ermöglicht eine Raumtemperatur von 20 °C ± 0,1K bei 45% ± 10% relative Feuchte was der Temperatur- und Feuchteklasse A nach VDI/VDE 2627 Blatt 1 entspricht [MESSZENTRUM QFM 2012].

5.2 Planung der Rotationskinematik

Einen zentralen Punkt der Arbeiten stellen die Planung und die Konstruktion der Rotationskinematik dar. Auf Basis der Simulation einerseits und eines Marktüberblicks andererseits kann das zu erreichende Ziel formuliert werden. Es wird eine Kinematik oder kinematische Kette gesucht, die einen installierten Sensor um einen Arbeitspunkt im Raum in mindestens einer Winkelrichtung in einem Drehbereich von mindestens ± 10° zu drehen vermag, so dass der Ort des Sensorarbeitspunkts im Raum bei wiederholter Adressierung weniger als ± 500 nm abweicht.

Der Winkelbereich von ± 10° ergibt sich einerseits nach Bild 27, da bei 10° eine signifikante Verbesserung sichtbar wird und andererseits aus der Tatsache, dass weniger verfügbare

Kinematiken aufgrund des Winkelbereichs ausgeschlossen werden. Die Genauigkeit von ± 500 nm resultiert aus der zentralen Forderung, dass die Auswanderung der Spitze aus dem Rotationszentrum eine geringere Messabweichung verursacht, als durch das Rotationsprinzip reduziert werden kann. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass heutige Sensoren der Mikromesstechnik Auflösungen im Nanometerbereich ermöglichen, wäre ein geringerer Wert anzuvisieren, jedoch zeigt eine Marktrecherche, dass handelsübliche Präzisionskinematiken Positionsabweichungen im Mikrometerbereich aufweisen. Aus diesem Grund musste bei diesem Zielkriterium vorab ein Kompromiss zwischen Verfügbarkeit und Abweichungsreduktion geschlossen werden. Beispielsweise sind bei Rotationskinematiken der preislichen Größenordnung von 10.000€ noch radiale Auswanderungen größer 3 µm in Kauf zu nehmen. Modelle mit geringerer Abweichung sind prinzipiell verfügbar, jedoch mit höheren Kosten verbunden. Exemplarisch sollen hier luftgelagerte, direktgetriebene Drehtische genannt werden, wie ein ABRS-200MP von Aerotech mit 200 mm Durchmesser, der eine radiale Auswanderung unter 250 nm aufweist.

Eine weitere Anforderung ergibt sich in der Notwendigkeit eines Überkopfbetriebs unter der Kopfplatte der NMM-1, so dass der Sensor nach unten zum Werkstück zeigt. Diese Anordnung wird durch die Funktionsweise der NMM-1 vorgegeben. Eine Alternativvariante, bei der anstatt des Sensors das Werkstück bewegt wird, würde eine Kinematik erfordern, die niedriger als 10 mm ist, da sonst der Sensor nicht im Abbepunkt der NMM-1 arbeiten kann. Wegen den Größeneinschränkungen und schlechterer Übertragbarkeit auf andere Positioniereinheiten, wurde diese Variante nicht weiter verfolgt.

Auftretende Abweichungen von Kinematiken

Vor der Darstellung möglicher Realisierungsvarianten sollen die auftretenden Positionsabweichungen von Kinematiken kurz am Beispiel eines Rotationstisches gezeigt werden, Bild 34. Es treten 6 unterschiedliche, sich überlagernde Abweichungskomponenten auf, unterteilbar in die Winkelabweichungen $\delta\varphi z(\varphi z)$, $\delta\varphi x(\varphi z)$, $\delta\varphi y(\varphi z)$ und die translatorischen Abweichungen $\delta z(\varphi z)$, $\delta x(\varphi z)$, $\delta y(\varphi z)$, [WECK U. BRECHER 2006], [DIN ISO 230-1 1997]. Die Hauptachse des Tisches ist hierbei die Rotation um Z, φz. Die zugehörige Abweichung $\delta\varphi z(\varphi z)$ ist die Winkelabweichung zum Sollwinkel, die bei geregelter Position hauptsächlich durch die Auflösung des Winkelencoders bestimmt wird. Nebenbewegungen um $\delta\varphi x(\varphi z)$ und $\delta\varphi y(\varphi z)$ gelten als Taumel um die X- bzw. Y-Achse und werden hauptsächlich von der Fertigungsgenauigkeit und Art der Führung bestimmt. Ebenso durch die Führung bestimmt ist die translatorische Abweichung $\delta z(\varphi z)$ entlang der Rotationsachse, auch Planlauf genannt, und die Rundlaufabweichung, bzw. Exzentrizität, in X $\delta x(\varphi z)$ und Y $\delta y(\varphi z)$. Neben Führungsabweichungen und der Auflösung der Encoder ergeben sich, je nach Art des Antriebes und der Lagerung, weitere Ursachen für Positionsabweichungen. An dieser Stelle sollen beispielhaft das Getriebespiel bei Schneckenantrieben und Druckluftschwankungen bei Luftlagern genannt werden. Auf dynamische Aspekte wie z.B. Bahnabweichungen soll zudem bis auf Hysterese nicht näher eingegangen werden, da der geplante Prototyp nur für einen Betrieb mit niedriger Geschwindigkeit ausgelegt wird. Die genannten Abweichungen und deren Ursachen lassen sich analog auf Linearachsen und auf Parallelkinematiken übertragen. Bei der Verkettung von kinematischen Elementen sind deren Einzelkomponenten über die Lage der Basiselemente zueinander zu verketten und zu überlagern. Insbesondere Winkelabweichungen gewinnen mit zunehmendem Abstand von ihrem Drehzentrum an Einfluss, weshalb kompakte Aufbauten zu bevorzugen sind.

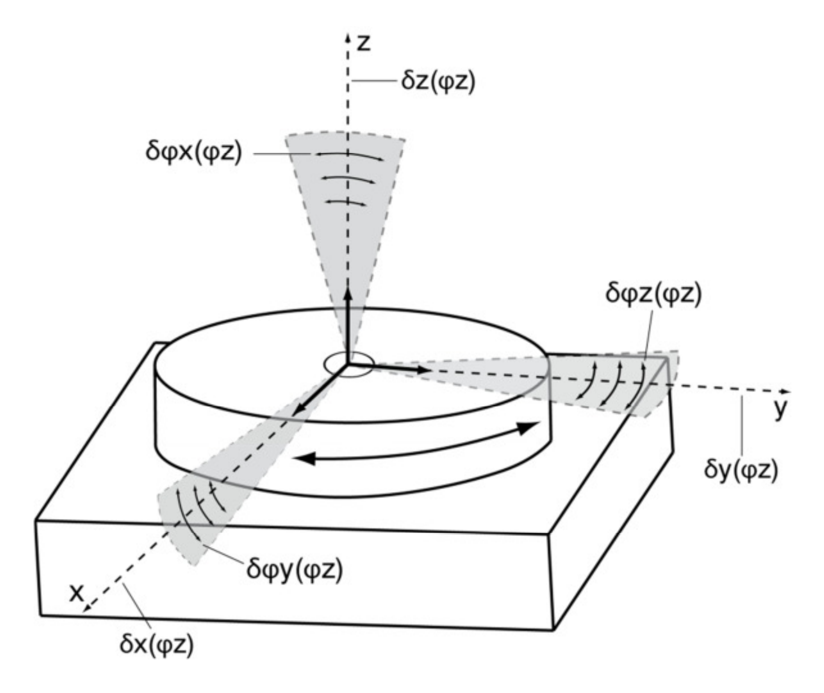


Bild 34: Auftretende Abweichungskomponenten eines Drehtisches

5.2.1 Untersuchte kinematische Ketten

Unter Berücksichtigung des Zielkriteriums wurden mehrere kinematische Ketten miteinander verglichen, aufgelistet in Tabelle 2.

Bezeichnung	**Aufbau**
Reguläres Pendel	Drehachse + Linearachse NMM-1
Reguläres Pendel mit Festkörpergelenk	Drehachse + Festkörpergelenk + Linearachse NMM-1
Inverses Pendel	Linearachse + Drehachse
Goniometer	Segment einer Drehachse
Parallelkinematik	Verknüpfte Linearachsen
Gestapelte Drehachsen	Gestapelte Drehachsen

Tabelle 2: Untersuchte kinematische Ketten

Reguläres Pendel

Eine Variante bestand in der Nutzung einer einzelnen Rotationsachse, deren Hauptachse parallel zur X/Y-Ebene der NMM-1 montiert wird. Bild 35 links zeigt dies in einem CAD-Entwurf und Bild 35 rechts zeigt das Zusammenspiel der Achssysteme Drehachse und NMM-1. Die Einstellung des Winkels erfolgt hier über die Drehachse. Der exzentrisch installierte Sensor beschreibt bei diesem Aufbau eine Kreisbahn, im CAD als Kreissegment dargestellt. Um den Arbeitspunkt des Sensors in einem festen Punkt des Werkstücks zu halten, muss die Kreisbahn durch eine Ausgleichsbewegung kompensiert werden, was durch die Positionsgenauigkeit der NMM-1 möglich ist. Die Positionsabweichung am Sensor wird bei diesem Aufbau durch die translatorischen Abweichungen der Drehachse und ihre Winkelabweichungen bestimmt, die durch die exzentrische Montage an Betrag gewinnen. Nachteilig an diesem Aufbau ist die Einschränkung des nutzbaren Arbeitsraumes der NMM-1 durch die Ausgleichsbewegung. Bei einem radialen Abstand des Arbeitspunktes zum Drehzentrum von 62 mm ergibt sich ein nutzbarer Winkelbereich von ± 10° unter Reduktion des lateralen Arbeitsbereiches von 25 mm auf 5 mm.

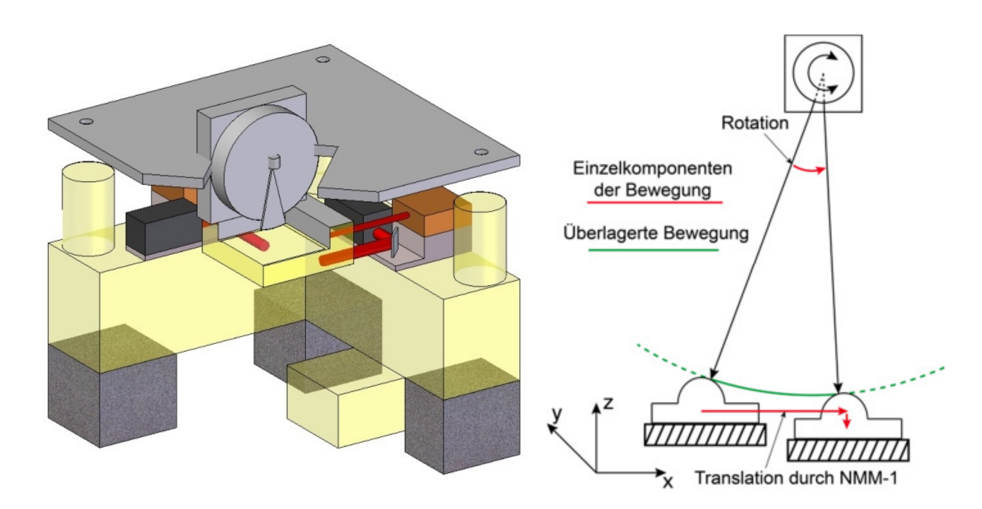


Bild 35: Links: Einbauplanung in CAD. Rechts: Bewegungsbahn des inversen Pendels

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass laut SIOS die Bewegungstrajektorie der NMM-1 nicht auf die Trajektorie der Drehachse abgestimmt werden kann und damit nur ein schrittweiser Betrieb möglich ist. Weitere Nachteile liegen in der Reduktion auf nur einen rotatorischen Freiheitsgrad, dessen Ausrichtung durch die Konstruktion vorgegeben ist.

Bei einer Marktübersicht verfügbarer Drehachsen hat sich ergeben, dass Modelle mit präzisen Wälzführungen erst ab einer Baugröße von etwa 100 mm Durchmesser erhältlich sind. Kleinere Modelle, die nur Gleitlager verwenden, zeigen Führungsabweichungen im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich, die meist nur durch Erfahrungswerte des Herstellers bekannt sind. Erst Achsen größerer Bauart sind herstellerseitig hinsichtlich Winkelabweichungen und translatorischen Abweichungen messtechnisch erfasst. Bei einer herstellerseitigen Kalibrierung und Korrektur werden diese reduziert und der Verlauf der Restabweichungen über den Drehwinkel ist bekannt. Letztendlich führt die Baugröße der Drehachse zu einem Abstand von Sensorarbeitspunkt zu Achsenmittelpunkt größer 50 mm, was durch die Winkelabweichungen zu einer hohen lateralen Positionsabweichung führt. Für ein favorisiertes Modell einer Drehachse, eine Aerotech ANT95-R, Tabelle 3, wurde die Abweichung des Arbeitspunktes berechnet auf Basis der Angaben des Datenblatts und einer exzentrischen Montage mit 62 mm Abstand. Eine Interpretation der Datenblattwerte erfolgt analog der quantitativen Angabe „Wiederholgrenze“, die den veralteten Begriff „Wiederholbarkeit“ ablöst [DIN 55350-13 1987], [DIN ISO 5725-1 1994]. Sie gibt die maximale Differenz zweier wiederholter Ermittlungsergebnisse mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% an. Bei Berechnung der Überlagerung wird eine symmetrische Verteilung um die Mitte der Spanne angenommen.

Datenblattangabe Aerotech ANT95-R	**Angegebener Wert**
Unidirektionale Wiederholbarkeit	0,5 arc sec
Taumel nichtsystematisch	3 arc sec
Planlauf nichtsystematisch	0,5 µm
Exzentrizität nichtsystematisch	1 µm
Weitere technische Daten (Nicht zur Berechnung genutzt)	
Winkelgenauigkeit	10 arc sec
Taumel systematisch	10 arc sec
Planlauf systematisch	2 µm
Exzentrizität systematisch	3 µm
Auflösung	0,01 arc sec
Bidirektionale Wiederholbarkeit	1,5 arc sec

Tabelle 3: Technische Daten der Drehachse Aerotech ANT95-R [ANT95-R]

Überlagert ergeben sie das gezeigte Positionsvolumen, Bild 36, in dem sich der Arbeitspunkt befinden kann. Systematische Abweichungen sowie die absolute Winkelgenauigkeit wurden nicht einbezogen unter der Annahme, dass diese im Zielsystem kompensiert werden bzw. nicht ins Gewicht fallen. Die Darstellung erfolgt im Achssystem der NMM-1 bei Sensorrotation um die Y-Achse und einer Messung in X-Richtung. Auf Basis der Datenblattangabe ergibt sich in Scanrichtung eine mögliche zufällige Abweichung von bis ± 950 nm.

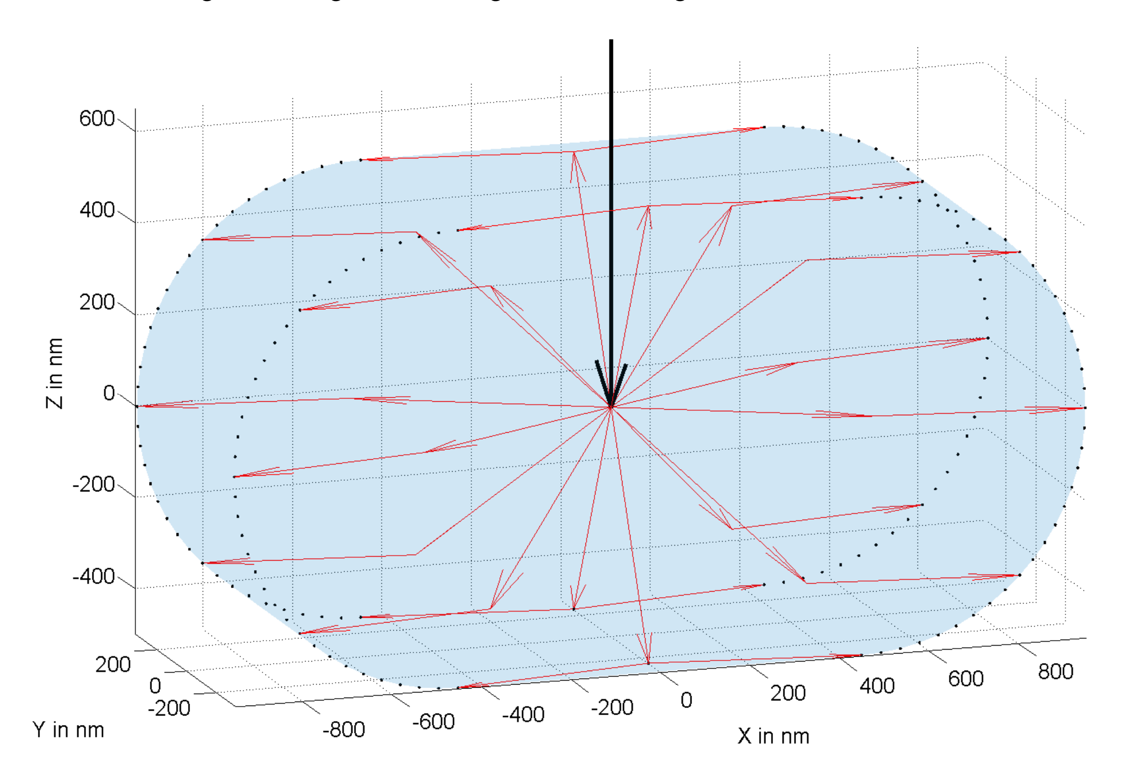


Bild 36: Volumen der Wiederholpräzision des Sensorarbeitspunkts bei regulärem Pendel. Rot: Vektorielle Überlagerung zufälliger Abweichungskomponenten, Schwarz: Verbindung zu Kinematik.

Reguläres Pendel mit Festkörpergelenk

Eine andere betrachtete Variante bestand in der Verknüpfung des Aufbaus „Reguläres Pendel" mit einer externen Führungsstruktur. Hierbei wird die Drehachse wie gehabt fest oberhalb des bewegten Werkstückträgers installiert und die Querbewegung bei Rotation von den Achsen der NMM-1 ausgeglichen. Der Sensor wird jedoch nicht direkt auf der Drehachse befestigt, sondern an einem Festkörpergelenk, das von der Drehachse bewegt wird. Festkörpergelenke, wie das „Butterfly Pivot", Typ HAFHA (BF-108) aus Titan vom Schweizer Zentrum für Elektronik und Mikrotechnologie (CSEM), erlauben eine rotatorische Führung mit einer geringen und stark systematischen Führungsabweichung von kleiner 1 µm radial [HENEIN U.A. 2003]. Nach einer Marktrecherche konnte kein besseres Produkt gefunden werden. Die Detailplanung brachte jedoch auch Nachteile zu Tage. Durch einen Betrieb im elastischen Bereich wird der nutzbare Winkel auf ± 7,5° eingeschränkt, was den vollen Einsatz des Rotationsprinzips verhindert, ein Betrieb darüber hinaus führt über die Zeit zu einem Ermüdungsbruch. Kritischer ist jedoch die Kopplung mit einer geeigneten Rotationsachse, da seitens des Festkörpergelenks bei einem Winkel von 7,5° ein Drehmoment von 0,13 Nm notwendig ist. Dieser Wert resultiert aus einer Drehsteifigkeit des Gelenks von 1 Nm/rad, gegeben im Datenblatt. Ein Drehtisch mit ausreichend Drehmoment wäre zum Betrieb notwendig, der zudem eine hohe angulare Auflösung bietet. Durch die exzentrische Installation

des Sensors hängt die Wiederholpräzision stark von der Winkelwiederholpräzision in Drehrichtung ab, welche wiederum nur vom Drehtisch bestimmt wird. Mikrodrehtische auf Piezobasis mit hochauflösenden Winkelencodern hatten im Marktvergleich nur ein maximales Drehmoment von 0,02 Nm. Es blieben damit nur teurere direktgetriebene Systeme mit Baugrößen von mindestens 100 mm, die genügend Auflösung und Leistung boten. Das benötigte Drehmoment führt bei nicht-selbsthemmenden Antrieben zusätzlich zu einem Wärmeeintrag in das System. Unter Annahme der Korrektion bekannter systematischer Abweichungsanteile lässt sich eine Wiederholgrenze von ± 3,2 µm annehmen. Diese resultiert zu geringem Anteil aus der unidirektionalen angularen Wiederholgrenze der Drehachse und zu hohem Anteil vom Festkörpergelenk mit 104 µrad bei Wechselbetrieb in Verbindung mit der notwendigen exzentrischen Montage des Sensors, [SPANOUDAKIS U. HENEIN 2004]. Eine Senkung der verbleibenden systematischen Anteile ist denkbar.

Inverses Pendel

Eine weitere kinematische Variante besteht in der Realisierung eines inversen Pendels aus einer Rotationsachse gestapelt auf einer Linearachse. Im Vergleich zur vorher gezeigten Variante erfolgt die Bewegung invers, d.h. die Drehachse selbst wird lateral verschoben, damit der Sensor während der Drehung im Arbeitspunkt bleibt. Bild 37 demonstriert das Schema. Vorteil gegenüber der vorherigen Variante ist die Entkopplung von den Achsen der NMM-1, der besseren Übertragbarkeit auf andere Systeme und die Möglichkeit, den vollen Arbeitsbereich der NMM-1 zu nutzen. Nachteilig ist jedoch die zu erwartende Wiederholpräzision, da zu den Abweichungen der Drehachse weitere sechs Abweichungen der Linearachse kommen, bei noch weiter steigendem Abstand von Sensorarbeitspunkt und Drehzentrum der Winkelabweichungen. Gegenüber der Variante „Reguläres Pendel" ist durch die Verkettung mit zusätzlichen Linearachsen eine schlechtere Wiederholpräzision zu erwarten, bei zudem höheren Kosten.

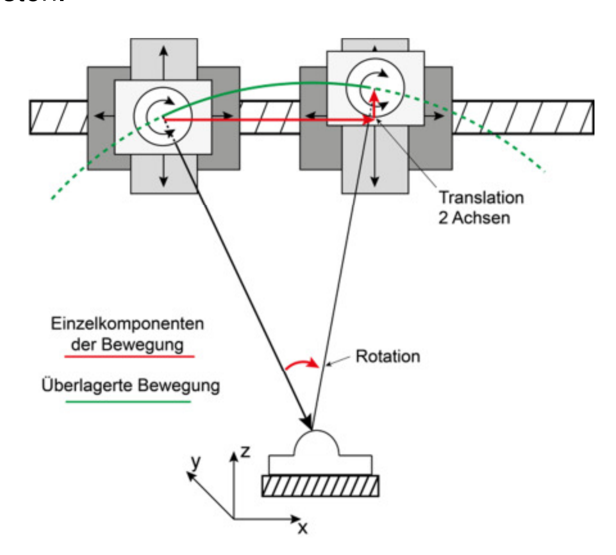


Bild 37: Bewegungsbahn eines inversen Pendels

Goniometer

Eine weitere kinematische Variante zur Realisierung der Rotation besteht in der Nutzung eines Goniometers. Dieses stellt ein Kreissegment mit einer außenliegenden Führung dar. Dieser Aufbau ist die einfachste Variante, direkt um einen Punkt zu drehen und der Drehmittelpunkt bleibt frei zugänglich von mehreren Seiten. Der Rotationspunkt ist durch die Konstruktion vorgegeben und wird vom Führungsradius bestimmt. Durch Stapelung zweier Go-

niometer können zwei rotatorische Freiheitsgrade realisiert werden. Nachteilig sind bei Standardprodukten auf dem Markt die verwendete Antriebstechnik und die Auslegung der Führungen. Die verwendeten Schneckengetriebe, sei es von Schrittmotoren oder Gleichstrommotoren angetrieben, erschweren eine reproduzierbare Positionsadressierung im Vergleich zu rotatorischen Direktantrieben. Zudem sind laut Herstellern bei Standardprodukten die Führungen nicht für einen Überkopfbetrieb ausgelegt und es ist mit hohen Führungsabweichungen zu rechnen. Zwar sind mittlerweile auch Modelle auf Basis von Festkörpern erhältlich, jedoch ist der Drehbereich auf den Bereich einstelliger Grad und weniger begrenzt.

Parallelkinematik

Eine kompliziertere kinematische Kette wird durch Parallelkinematiken realisiert, im speziellen ein Hexapod oder ein Tripod. Mehrere Beine greifen an einer gemeinsamen Kopfplatte an und sind mit dieser und der Bodenplatte jeweils drehbar verbunden. Durch synchronisierte ungleichmäßige Längenänderung der Beine lässt sich die Kopfplatte in drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden bewegen. Die angeschlossene Steuerung übersetzt eine gewünschte Translation bzw. Rotation in die notwendigen Längenänderungen. Dieses Prinzip wird z.B. in mehreren Varianten bei Produkten von Physik Instrumente gelöst. In abgewandelter Form ist dies bei einem Smaract SmarPod 110.45 realisiert, der auf drei nach außen gerichteten Beinen basiert, deren Basis zusätzlich lateral bewegt werden kann. Die Ansteuerung erfolgt für den Anwender üblicherweise in kartesischen Koordinaten und es kann zusätzlich direkt über den Controller um einen frei wählbaren Punkt im Raum rotiert werden. Dieser Aspekt ist für eine spätere Einbindung in einen Gesamtaufbau sehr von Nutzen. Diese Variante ermöglicht zudem die meisten Freiheitsgrade für die Rotation inklusive translatorischer Bewegung. Zur Erzielung der anvisierten Genauigkeit kamen nach einer Marktrecherche nur Parallelkinematiken mittels Piezo-Antrieb in Frage, wie der Smaract SmarPod 110.45, der ALIO Industries AI-HEX-HR2-SS oder spezielle Systeme mit Gleichstromantrieb wie die Micos SpaceFAB SF-3000 BS. Mittels Piezo Elementen können Stellbewegungen im Subnanometerbereich realisiert werden, Bewegungen größer als zweistellige Mikrometer werden in einem schrittbasierten Prozess durchgeführt. Im Falle des Smaract Systems ist der Piezo-Aktor kraftschlüssig durch Reibung mit der Drehscheibe verbunden und bewegt diese bei langsamer Ausdehnung. Bei schneller Bewegung rutscht der Aktor an dieser durch ihre Massenträgheit vorbei und kann einen neuen Schritt ausführen.

Auf Basis der Datenblattwerte für einen Smaract SmarPod 110.45 wurde eine Berechnung des zu erwarteten Abweichungsvolumens durchgeführt. Im Datenblatt wurden die folgenden translatorischen und rotatorischen Abweichungen gegeben, sowie der Arbeitsbereich:

Datenblattangabe Smaract SmarPod 110.45	**Angegebener Wert**
Wiederholbarkeit translatorisch X, Y, Z	200 nm
Wiederholbarkeit rotatorisch φX, φY, φZ	10 µrad
Weg translatorisch X, Y	20 mm
Weg translatorisch Z	10 mm
Weg rotatorisch φX, φY	± 10°
Weg rotatorisch φZ	± 17,5°

Tabelle 4: Technische Daten Smaract SmarPod 110.45 [SMARACT 2011]

Auf Basis einer Einbauplanung im CAD Modell Bild 38 links wurde das zu erwartende Positionsvolumen für den Sensorarbeitspunkt mit einem Abstand Arbeitspunkt – Drehzentrum von 26 mm berechnet, Bild 38 rechts.

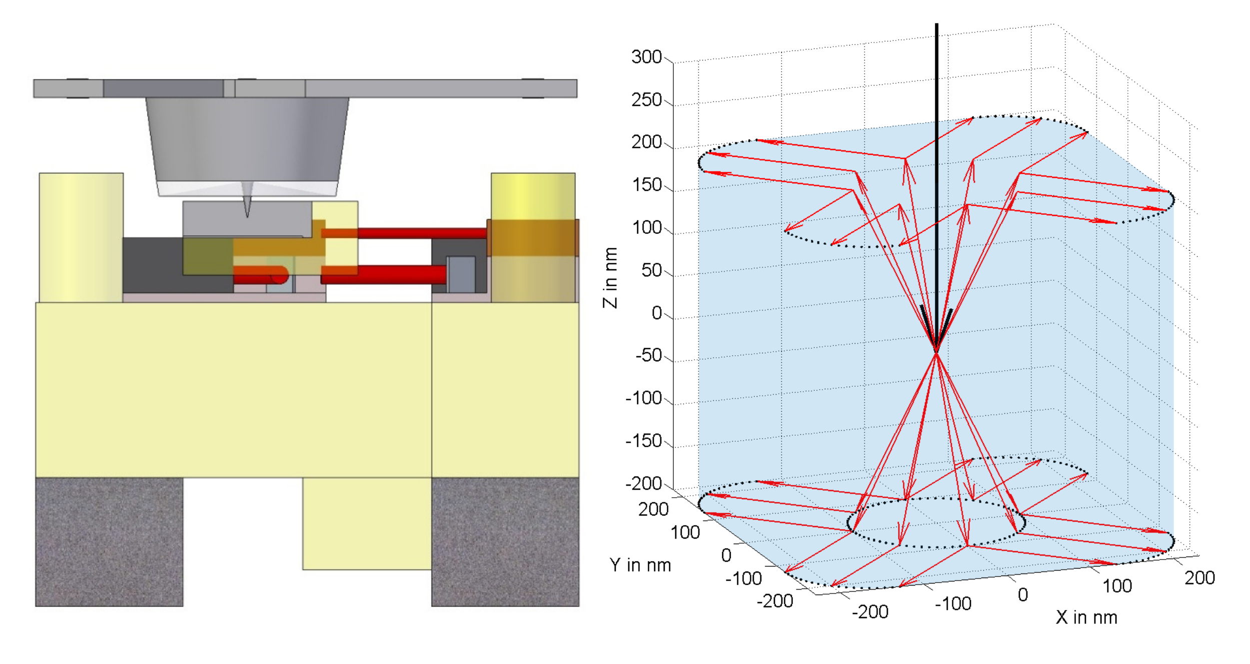


Bild 38: Links: CAD Modell Einbauplanung Smaract SmarPod, Darstellung des Bewegungsvolumens. Rechts: Volumen der Wiederholpräzision des Sensorarbeitspunkts bei Parallelkinematik. Rot: Vektorielle Überlagerung der Abweichungskomponenten, Schwarz: Verbindung zu Kinematik.

Auf Basis der Datenblattwerte, ohne eine Separation in systematische und nichtsystematische Anteile zu haben, ergibt sich eine maximale Abweichung von ± 230 nm in X- und Y-Richtung der NMM-1 und ± 100 nm in Z-Richtung. Bei einer zusätzlichen Kompensation systematischer Anteile ließe sich das Volumen weiter verkleinern.

5.2.2 Messtechnische Überprüfung einer Parallelkinematik

Auf Basis dieser Vorabschätzungen der Parallelkinematik, die gegenüber dem regulären Pendel eine vierfach bessere Wiederholpräzision erwarten lassen, wurde das System Smaract SmarPod 110.45 am Messzentrum des Lehrstuhls QFM als Teststellung untersucht. Das Ziel der Untersuchung war neben einer Evaluation der Softwareschnittstellen die Überprüfung der Angaben zur Präzision aus dem Datenblatt. Im Speziellen wurde, in Übereinstimmung mit der späteren Anwendung, die Auswanderung eines am SmarPod fixierten Artefakts bei der Rotation gemessen.

Als Messgerät kam ein Multisensor Koordinatenmessgerät Werth Videocheck UA 400 und ein taktil schaltender Taster TP200 von Renishaw zum Einsatz. Das KMG hat laut Datenblatt eine Längenmessabweichung E3 von (0,75 + L/500) µm, der Taster eine Antastabweichung von 1,9 µm. Über eine Adapterplatte wurde ein Taststift mit Rubinkugel mit D = 6 mm, der indirekt zur Erfassung der Achsbewegungen dient, auf den Probenträger des SmarPod Systems aufgebracht. Es wurde über die Erfassung der Kugel in Bezug zur Smaract Kopfplatte der Pivotpunkt in Näherung bestimmt und konfiguriert. Die Ermittlung des Kugelmittelpunktes erfolgt während der Messung über fünf Messpunkte am Pol der Kugel in den Richtungen +X, +Y, -X, -Y, +Z mit dem Nullpunkt im Kugelmittelpunkt. Bild 39 links zeigt das SmarPod System mit dem installierten Kugelartefakt. Von einem Überkopfbetrieb wurde mangels Realisierbarkeit im Videocheck UA System abgesehen.

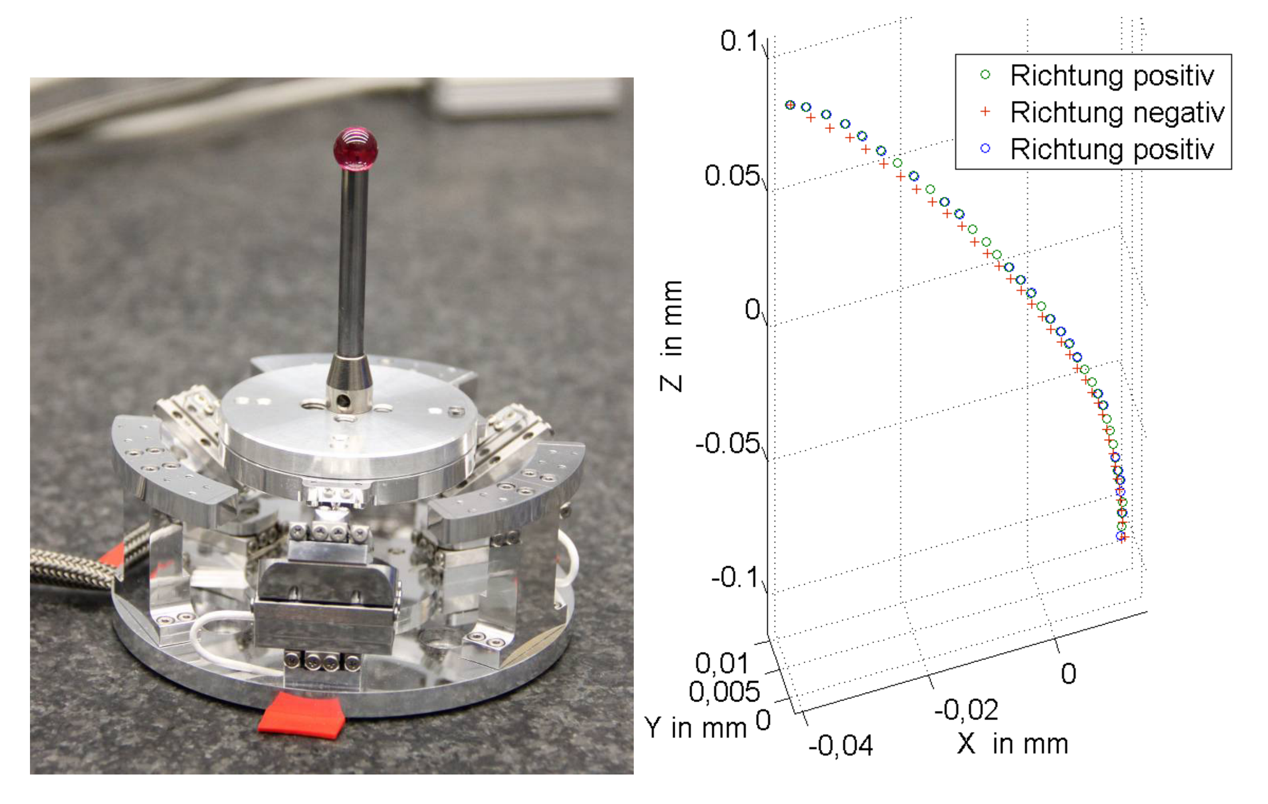


Bild 39: Links: Messaufbau zur Untersuchung der Wiederholpräzision, Rechts: Koordinaten der Rubinkugel während der Rotation um X

Die Eingangsuntersuchung in Bild 39 rechts zeigt die erfassten Artefaktmittelpunkte über einem Rotationsbereich von -9° bis +9° in 0,5° Schritten bei zwei Läufen in die positive Richtung und einem in die negative. Der nutzbare Winkelbereich wurde prinzipbedingt durch einen Pivotpunkt oberhalb der Kopfplatte reduziert. Durch eine suboptimale Positionierung des Pivotpunkts in den Artefaktmittelpunkt ist eine Bahn in Form eines Kreissegments zu erwarten, wie auch in Bild 39 rechts sichtbar. Die Differenz zur Kreisbahn ergibt sich durch Führungsabweichungen. Unter der Annahme, dass dieses Verhalten über die NMM-1 kompensiert werden kann, wurde der Fokus auf die Präzision eines einzelnen Punktes gelegt. Für die gleichsinnige Richtungsadressierung einer Winkelposition ergab sich eine Spannweite im 3D Raum von unter 300 nm bis unter 100 nm, was innerhalb des Unsicherheitsbereichs des Messgeräts Videocheck liegt. Die Spannweite im Raum bei gegensinniger Bewegung lag hingegen bei 2,0 bis 2,5 µm durch das Auftreten von Hysterese. Dies ist auch in Bild 39 rechts schon sichtbar. Da laut Hersteller das System hysteresefrei arbeitet, jedoch das Leihgerät eine hohe Anzahl von Betriebsstunden auf diversen Messeauftritten hatte, ist eine verschleißbedingte Ursache anzunehmen, die für Piezoschrittantriebe normal ist. Da selbst eine Hysterese zu einem gewissen Grad als systematisch angesehen werden und damit kompensiert werden kann, wurde die Präzision an einzelnen Winkelpositionen bei gleichsinniger Richtungsadressierung mit einer erhöhten Anzahl von Wiederholungen untersucht. Insgesamt fünf Winkelstellungen wurden je fünfmal adressiert von 9° bis -9° in 4,5°-Schritten.

[DIN 55350-13 1987] und [DIN ISO 5725-1 1994] empfehlen als primäre quantitative Angabe zur Präzision die Wiederholstandardabweichung, auch [GEIGER U. KOTTE 2008]. Diese wurde ermittelt durch Berechnung der Abstände der Kugelpunkte zu ihrem gemeinsamen Mittelpunkt an einer Winkelposition. Bei reiner Betrachtung der Norm der Abstandsvektoren wird der Informationsgehalt begrenzt, sowie durch eine resultierende Betragsverteilung die korrekte Auswertung erschwert. Laut [GEIGER U. KOTTE 2008] sollte eine Auswertung über Ta-

bellenwerke durchgeführt werden, wie z.B. in [LEONE U.A. 1961]. Es werden stattdessen im Einklang zu den Datenblattangaben die normalverteilten kartesischen Einzelkomponenten betrachtet. Es resultiert bei Betrachtung aller 25 Abstandsvektoren über den kompletten Drehbereich eine Wiederholstandardabweichung σ_r von 31,4 nm in X, 57,9 nm in Y und 73,8 nm in Z. Um diese Werte mit den Datenblattwerten zu vergleichen wird nach [DIN ISO 5725-1 1994] die Wiederholgrenze r, (früher Wiederholbarkeit), berechnet. Bei normalverteilten Größen ergibt sich r für ein Vertrauensintervall von 95% zu $r=2{,}8*\sigma_r$. Es resultieren 87,6 nm in X, 162,1 nm in Y und 206,6 nm in Z. Unter der Berücksichtigung, dass die erfasste unidirektionale Wiederholgrenze innerhalb des Unsicherheitsbereichs des Messsystems Videocheck liegt und beim gewählten Kugelabstand mit den Datenblattwerten ein Wert von 740 nm in X und Y sowie 400 nm in Z möglich wären, lassen sich die Datenblattangaben für unidirektionalen Betrieb als plausibel einstufen. Im Vergleich mit dem regulären Pendel bietet diese Kinematik bei gleichem Winkelbereich die bessere Genauigkeit und eine bessere Ansteuerung bei mehr Freiheitsgraden.

5.2.3 Gestapelte Drehachsen

Eine letzte in Betracht gezogene kinematische Kette basiert auf Stapelung zweier Drehtische. Der Aufbau ist schematisch in Bild 40 links dargestellt und als ausgearbeitetes CAD-Modell in Bild 40 rechts. Die Montagefläche des oberen Tischs ist parallel zum Werkstückträger der NMM-1 angeordnet, so dass die Rotationsachse fluchtend mit der Z-Achse verläuft. Über ein gewinkeltes Adapterstück ist die zweite Rotationsachse unter der ersten mit 45° angebracht. Auf der zweiten Achse ist wiederum der Sensor installiert, dessen Arbeitsrichtung zusätzlich 45° zur zweiten Achse ausgerichtet ist und damit wieder parallel zur Drehachse des oberen Drehtisches bzw. senkrecht zum Werkstückträger steht. Die Besonderheit dieser Anordnung ist, dass der Arbeitspunkt des Sensors konstruktiv in die Rotationsachsen beider Drehtische gelegt wird. Bei einer idealen Ausrichtung in diesen imaginären Punkt würde der Sensorarbeitspunkt bei Rotation translatorisch feststehen.

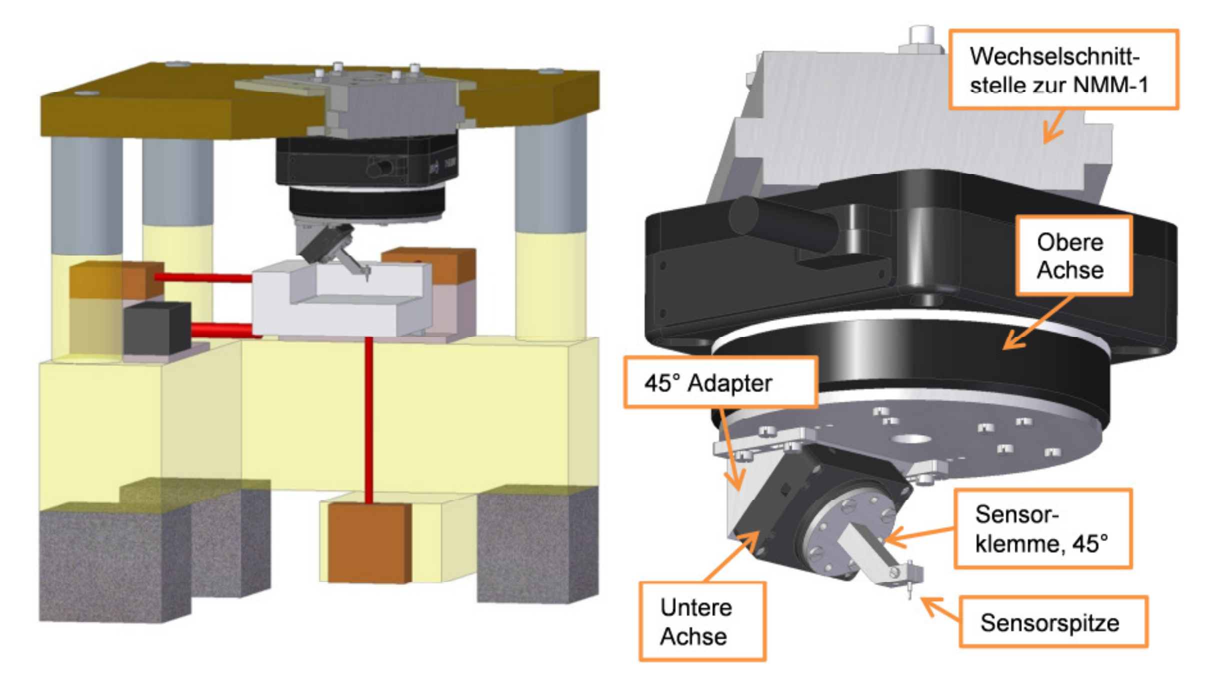


Bild 40: Einbauplanung CAD Modell. Rechs: Aufbau der gestapelten Achsen

Ausgehend von beschriebener Nulllage führt eine Rotation um die untere Achse, betrachtet im kartesischen Koordinatensystem der NMM-1, zu einer Neigung des Sensors auf die X/Y-Ebene zu. Die Rotationskomponenten um X und Y ändern sich hierbei mit der Neigung. Um eine bestimmte Ausrichtung im Raum zu erhalten, erfolgt zusätzlich mit der oberen Drehachse eine Rotation um die Z-Achse, bis die gewünschte Rotationskomponenten um X und Y erreicht sind. Dieses System erlaubt einen Rotationsbereich um φX und φY von ± 90°, was die Erfassung einer vollen Hemisphäre ermöglicht.

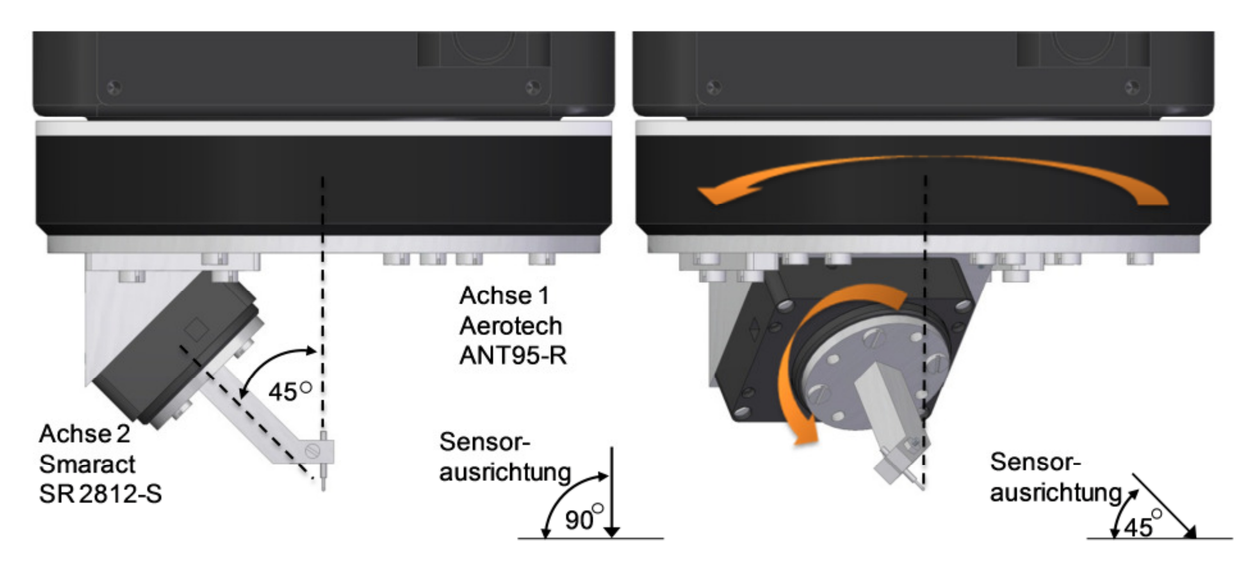


Bild 41: Links: Ausrichtung 90°, Rechts: Ausrichtung 45°

Zu erwähnen ist eine resultierende Rotationskomponente um die Sensorachse. Dieser Effekt ist bei flächig arbeitenden Sensoren zu berücksichtigen, hat bei den anvisierten Punktsensoren jedoch keinen Einfluss. Bild 41 zeigt die Rotation beim Übergang von 90° zu 45°.

Diese kinematische Variante wurde weiter verfolgt und eine Berechnung der erzielbaren Wiederholpräzision durchgeführt. Für die obere Rotationsachse wurde erneut die Aerotech ANT95-R gewählt, für die untere wurde nach einer Marktrecherche auf eine Smaract SR-2812-S zurückgegriffen. Diese besitzt ein Keramiklager mit einem Piezoantrieb, der über einen integrierten Winkelgeber positionsgeregelt ist. Wie für diese Klasse von Drehtischen üblich, ist keine Kalibrierung über einen Autokollimator o.ä. vorhanden. Die Abweichungen wurden auf Basis von Erfahrungswerten des Herstellers bzw. Vergleichswerten der Aerotech Achse übernommen:

Technische Daten Smaract SR-2812-S und Annahmen	
Auflösung	0,0072 arc sec
Exzentrizität gesamt	3 µm (Erfahrungswerte Hersteller)
Planlauf:	0,5 µm (Annahme analog Aerotech)
Taumel	3 arcsec (Annahme analog Aerotech)

Tabelle 5: Technische Daten Smaract SR-2812-S [SMARACT 2011]

Mit Berechnung eines Abstandes Sensorarbeitspunkt-Drehzentrum Aerotech Achse von 43,6 mm und Sensorarbeitspunkt – Drehzentrum Smaract Achse von 29,3 mm ergibt sich ein mögliches Volumen des Arbeitspunktes von angeschrägter Form mit den Abmaßen ± 1,5 µm und ± 1,35 µm lateral sowie ± 0,8 µm in Z, dargestellt in Bild 42. Der Haupteinflussfaktor ist hier die Exzentrizität der Smaract-Achse.

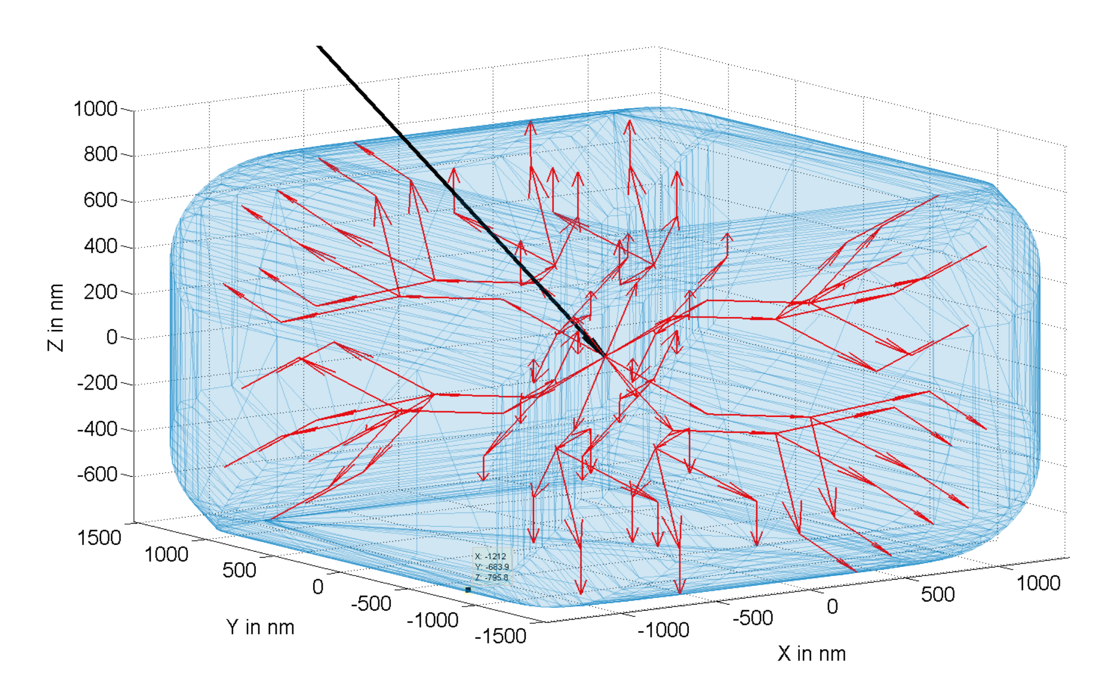


Bild 42: Volumen der Wiederholpräzision des Sensorarbeitspunkts bei gestapelten Drehachsen. Rot: Vektorielle Überlagerung zufälliger Abweichungskomponenten, schwarz: Verbindung zu Kinematik.

Eine weitere Besonderheit bei diesem Aufbau ist die Insensitivität gegenüber der Winkelauflösung und der angularen Wiederholgenauigkeit. Bei einer idealen Positionierung des Sensorarbeitspunktes im Schnittpunkt der Drehachsen führt eine Winkeländerung der Achsen zu keiner translatorischen Auswanderung und nur zu einer Rotation. Durch den Winkelakzeptanzbereich des Sensors führen Winkelabweichungen unter 0,1 ° zu keiner merklichen Messabweichung, siehe auch später Kapitel 8.4. Die resultierenden Abweichungen werden damit primär durch die Führungen in den Achsen verursacht.

Im Vergleich zur Variante des regulären Pendels ist bei idealer Montage keine Ausgleichsbewegung durch die NMM-1 notwendig und der volle Arbeitsbereich steht zur Verfügung. Der nutzbare Winkelbereich ist mit ± 90° gegenüber ± 10° ebenfalls vorzuziehen. Allein die zu erwartende Wiederholpräzision ist um maximal 500 nm schlechter. Positiv bei diesem Punkt ist jedoch die Lastverteilung zu bewerten. Im stationären Zustand wirkt auf die obere Achse kein Drehmoment durch die Schwerkraft und auf die untere Achse durch die gekippte Lage nur ein reduziertes. Letztere Achse ist durch den Piezoantrieb selbsthemmend und benötigt zur Positionshaltung wenig bis keine Energie. Dieser Aufbau bringt weniger Wärme ins System ein und ist nur eingeschränkt auf die Positionsregelung der Einzelachsen angewiesen. Beim regulären Pendel oder mit dem Festkörpergelenk hingegen müsste die Rotationskinematik ein kontinuierliches Drehmoment aufbringen, um die Position gegen die Schwerkraft aktiv zu halten, eine Selbsthemmung ist nicht vorhanden. Das wirkende Drehmoment kann durch Aufbringen von Ausgleichsgewichten reduziert werden, aber die Positionsstabilität ist weiterhin stark von der Positionsregelung abhängig.

Nach Analyse der kinematischen Ketten und Gegenüberstellung der Varianten unter Abschätzung der Wiederholpräzision auf Basis konkreter Produkte, konnte eine Variante ausgewählt werden. Tabelle 6 zeigt die betrachteten Lösungen im Überblick. Ein Vergleich mit den Zielanforderungen zeigt nur bei der Parallelkinematik eine zu erwartende Erfüllung. Aus finanziellen Aspekten fiel diese Variante letztendlich aus, was das reguläre Pendel und die gestapelten Drehachsen zur Entscheidung lässt, welche beide außerhalb der geforderten

Positionsgenauigkeit liegen. Aufgrund der geringeren Einschränkungen hinsichtlich des Arbeitsbereichs der NMM-1, des größeren Winkelbereichs und der geringeren Anforderung an die Positionsregelung der Achsen, wurden die gestapelten Achsen gewählt. Über die Konstruktion wurde in [WECKENMANN U. SCHULER 2012] und [SCHULER U.A. 2012A] berichtet.

Bezeichnung	Winkelbereich	Wiederholgrenze	Sonstiges
Reguläres Pendel	± 10°	<= ± 1 µm	Arbeitsbereich NMM-1 auf 5 mm reduziert
Reguläres Pendel mit Festkörpergelenk	± 7,5°	<= ± 3,2 µm	Arbeitsbereich NMM-1 auf 5 mm reduziert, Wiederholgrenze u.U. senkbar
Inverses Pendel	~ ± 45°	>> ± 1 µm	Unpräziser als reguläres Pendel bei höheren Kosten
Goniometer	± 5° bis ± 45°	>>> ± 1 µm	Kein Einbau Überkopf
Parallelkinematik	± 10°	<= ± 0,25 µm	Vergleichsweise hohe Kosten
Gestapelte Drehachsen	± 90°	<= ± 1,5 µm	Relevanz der Winkelauflösung gesenkt

Tabelle 6: Vergleich der Realisierungsvarianten und erwarteten Leistungsdaten

5.3 Planung des Sensors

Nach Festlegung der Rotationskinematik ist die Wahl des Sensors ausstehend. Um im Einklang mit der vorausgegangen Simulation zu bleiben, wird ein Sensor auf taktiler, bzw. quasitaktiler Basis benötigt. Der einzubindende Sensor soll analog der Simulation eine morphologische Überlagerung zeigen und mit den beschriebenen Tastspitzen arbeiten können und wird im naheliegendsten Fall durch ein Profilometer realisiert. Zum Zwecke der besseren Realisierung des Prototyps sollen weitere Sensoren, die diesen Kriterien entsprechen, bzw. entsprechen können, betrachtet werden. Die verwandten mikrotaktilen Systeme sind hinsichtlich der Tastelementgröße begrenzt, jedoch können sie durch den sphärischen Taster und die dreidimensionale Kontaktpunkterfassung einen größeren Winkelbereich abdecken, ohne dass eine Rotation zwingend notwendig wird. Bei Verwendung einer Tastkugel fällt zudem das Problem der Flankenkollision weg. Durch die Größenbeschränkung mikrotaktiler Systeme könnte das Rotationsprinzip jedoch nur mit großen Spitzen von z.B. 300 µm Durchmesser durchgeführt werden.

Als weiterer Sensor für den Prototyp kommt ein quasitaktiles System auf Tunnelstrombasis in Frage, wie in 2.1.6 beschrieben. Dieses erlaubt ebenfalls den Betrieb mit sphärischen Sonden und eine Antastung in drei Dimensionen. Darüber hinaus ist das System in der Tastelementgröße und -form nicht begrenzt, weshalb auch kleinere Kugeln und direkt Profilometerspitzen genutzt werden können, um die Auflösung zu steigern. Die kontaktfreie Arbeitsweise des Sensors muss keine Restriktionen hinsichtlich der Hertz'schen Pressung berücksichtigen und erlaubt beliebig kleine Spitzenradien, bzw. kleine Öffnungswinkel bis hin zu Tastnadeln, wie sie bei Rastertunnelmikroskopen zum Einsatz kommen [HOFFMANN 2009]. Für das System spricht außerdem die sehr gute mechanische Integrierbarkeit in den Prototyp und die bestehenden Erfahrungen beim Betrieb dieses Systems mit der NMM-1. Die räumliche Trennbarkeit der Komponenten der Sensorelektronik und die sehr kompakt realisierbare Sensorspitze erlauben mehr konstruktive Freiheitsgrade beim Entwurf des Prototyps bei gleichzeitig deutlicher Gewichtsreduktion gegenüber einem Profilometerkopf. Zu berücksichtigen ist prinzipbedingt die Begrenzung auf elektrisch leitfähige Werkstücke und Artefakte, wie z.B. Edelstahl oder Invar. Die Simulationsroutinen sind bei diesem Sensor weiterhin

gültig, da das System quasitaktil arbeitet. Simulationstechnisch besteht nur ein Unterschied in der Dimension der Spitze, da sich die effektive Spitzengröße aus der mechanischen Spitze, überlagert vom Arbeitsabstand weniger Nanometer, ergibt. Zusammengefasst erlaubt das tunnelstrombasierte Sensorsystem einen beliebigen Antastvektor im dreidimensionalen Raum bei Sub-Nanometer Auflösung in Antastrichtung ohne Größen- und Formeinschränkungen beim Tastelement dank Kontaktfreiheit. Aus diesen Gründen und der einfacheren Integrierbarkeit soll es anstatt eines echten Profilometers genutzt werden, um das Rotationsprinzip praktisch umzusetzen.

5.3.1 Baugruppen des quasitaktilen Sensors

Erfahrungen mit dem elektrischen Sensorsystem und eine messtechnische Evaluation wurden in den Arbeiten von Hoffmann [HOFFMANN 2009] dokumentiert. Diese Arbeiten basieren größtenteils auf der zweiten Version der am Lehrstuhl entwickelten Sensorelektronik, wie bei [WECKENMANN U.A. 2008A] beschrieben. Diese ist noch in einer externen 19 Zoll Einheit ausgelagert und mittels THT (through hole technology) realisiert. Für eine bessere Integration in den Versuchsaufbau, wie sie beim Rotationsprototyp benötigt wird, sollten in einer dritten Version der Sensorelektronik die Aspekte Integrierbarkeit durch Modularisierung, Dynamik, Empfindlichkeit und Signal-Rauschverhältnis optimiert werden. Einen Überblick der zu optimierenden Komponenten zeigt das Funktionsschema des Sensors, Bild 43, deren Funktion sich wie im Folgenden darstellt.

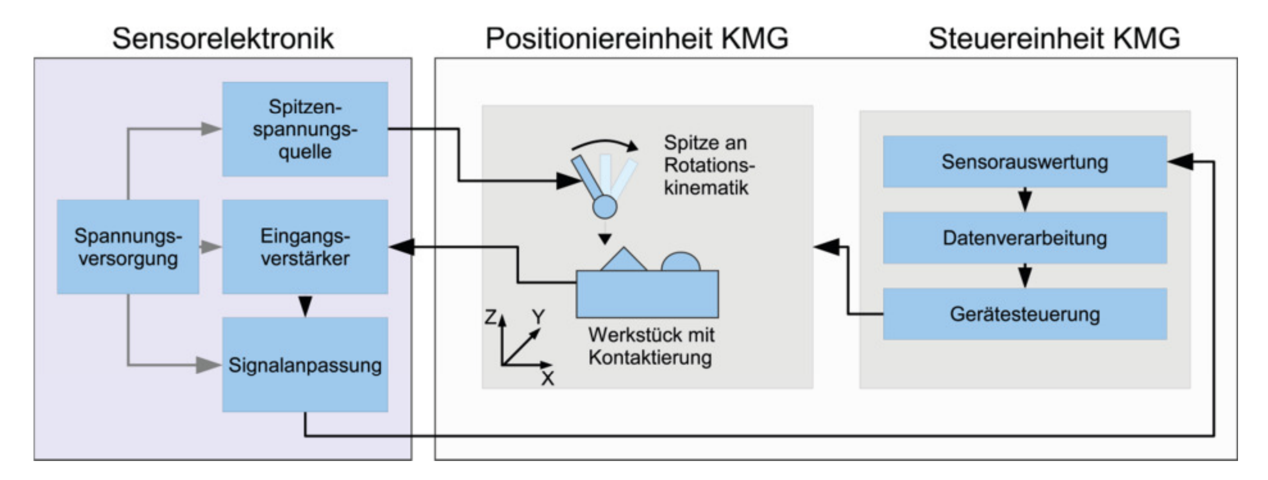


Bild 43: Komponenten des elektrischen Sensors

Spitzenspannungsquelle:
Aufgabe der Spitzenspannungsquelle ist die Bereitstellung der Hilfsspannung, um den Tunnelstrom zu ermöglichen. Diese Spannung ist üblicherweise im Bereich von 0 bis 1 Volt nötig und sollte möglichst stabil sein. Sie wird mit der Sensorspitze verbunden.

Eingangsverstärker / Verstärker:
Stromsignale im Nanoamperebereich sind stark störanfällig und können nicht direkt von Analog-Digital-Umsetzern erfasst werden, [KEITHLEY 2004]. Deshalb wird in der Verstärkerbaugruppe ein Strom von üblicherweise 0 bis 10 nA in eine proportionale Spannung von 0 bis 10 V umgewandelt. Der Verstärker bestimmt die erzielbare Empfindlichkeit.

Signalanpassung:
Diese Baugruppe dient der Signalstabilisierung und der Bereichsanpassung an das angeschlossene Koordinatenmessgerät.

Spitze:
Über die Spitze wird der Stromfluss in das Werkstück eingeleitet. Ihre Größe, Form und Formabweichung beeinflusst die messtechnischen Eigenschaften des Gesamtsystems. Mögliche Spitzenformen sind Kegelspitzen, Kugeln oder Nadeln.

Spitzenhalterung:
Die Spitze muss mechanisch an das Koordinatenmessgerät und die Rotationseinheit angekoppelt werden. Die notwendige Halterung soll die Spitze mechanisch fixieren und eine elektrische Kontaktierung der Spitze für die Spitzenspannung ermöglichen. Zusätzlich muss die Spitze noch vom Rest des Gerätes isoliert werden.

Probenkontaktierung:
Neben der Spitze muss auch das Werkstück elektrisch kontaktiert werden, um den Tunnelstrom von Pico- bis Nanoampere zum Verstärker zu leiten. Auch diese Kontaktierung muss elektrisch vom Koordinatenmessgerät isoliert sein. Insbesondere die Probenkontaktierung muss elektrisch geschirmt ausgeführt werden bei minimal möglicher Länge, da sonst durch die Umwelt induzierte elektrische Störungen das Signal um ein vielfaches im Betrag überlagern. Zudem beeinflussen das Signal auch bei geschirmten Leitungen Leckströme über die Isolierung und kapazitive Effekte bei Signaländerungen.

Spannungsversorgung:
Die Spannungsversorgung stellt eine stabilisierte Betriebsspannung für die Sensorelektronik zur Verfügung und trennt diese von Störungen auf dem Stromnetz im Labor.

Verbindung zum Koordinatenmessgerät:
Der Anschluss des Sensorausgangssignals erfolgt an der Eingangsbaugruppe des Koordinatenmessgerätes, üblicherweise als analoges Spannungssignal.

5.3.2 Entwicklung der Sensorelektronik

Die beschriebenen interagierenden Baugruppen sollten überarbeitet werden. Ziel war die Auftrennung und Modularisierung der Baugruppen, um diese möglichst nah an ihrem Wirkort einzusetzen und die Leitungslängen zu reduzieren. Zudem sollte der Übergang von THT Bauteilen zu SMD (Surface Mount Device) erfolgen, die einen höheren Miniaturisierungsgrad und ebenfalls kürzere Signalpfade ermöglichen. Ein weiteres Ziel war die Überarbeitung der verwendeten Schaltungen und integrierten Schaltkreise, um eine höhere Empfindlichkeit bei weniger Signalrauschen zu ermöglichen. Die Überarbeitung der Baugruppen wird im Folgenden beschrieben.

Spitzenspannungsquelle

Der Betrag der Spitzenspannung geht linear in die Gleichung für das Sensorausgangssignal ein, Gleichung (7), wodurch sich das Optimierungsziel von geringer Schwankung ergibt. Weitere Anforderungen resultieren aus dem Bedarf verschiedener Spannungswerte, womit die Versorgung mindestens im Bereich von 200 mV bis 1500 mV einstellbar sein sollte. Bezüglich der Strombelastbarkeit wird von einer vernachlässigbaren Belastung ausgegangen. Die

bestehende Lösung auf Basis eines linearen Spannungsreglers vom Typ 78L05 mit angeschlossenem Spannungsteiler und Spannungsfolger sollte idealerweise direkt durch eine Referenzspannungsquelle ersetzt werden, da im Normalbetrieb nur ein Stromfluss weniger Nanoampere vorliegt. Referenzspannungsquellen sind auf geringe Temperaturdrift und niedriges Rauschen optimiert und basieren intern auf einer Halbleiterreferenz, die während des Fertigungsprozesses justiert wird. Es fand sich eine Lösung in der Form des LT1635 von Linear Technology, welcher aus einer Präzisionsreferenz und einem Operationsverstärker in einem einzigen Chip besteht, [LT1635]. Im Vergleich zum diskreten Entwurf mit dem 78L05 liefert diese Einchiplösung eine Referenz mit einer Ausgangsregelung von 30 µV pro Volt Eingangsänderung gegenüber 10 mv/V und einer üblichen Genauigkeit von 2% gegenüber 5%. Hinsichtlich der Genauigkeit sind andere Referenzquellen zwar überlegen, jedoch benötigen diese eine zusätzliche Operationsverstärkerstufe um den gewünschten Ausgangsspannungsbereich abzudecken.

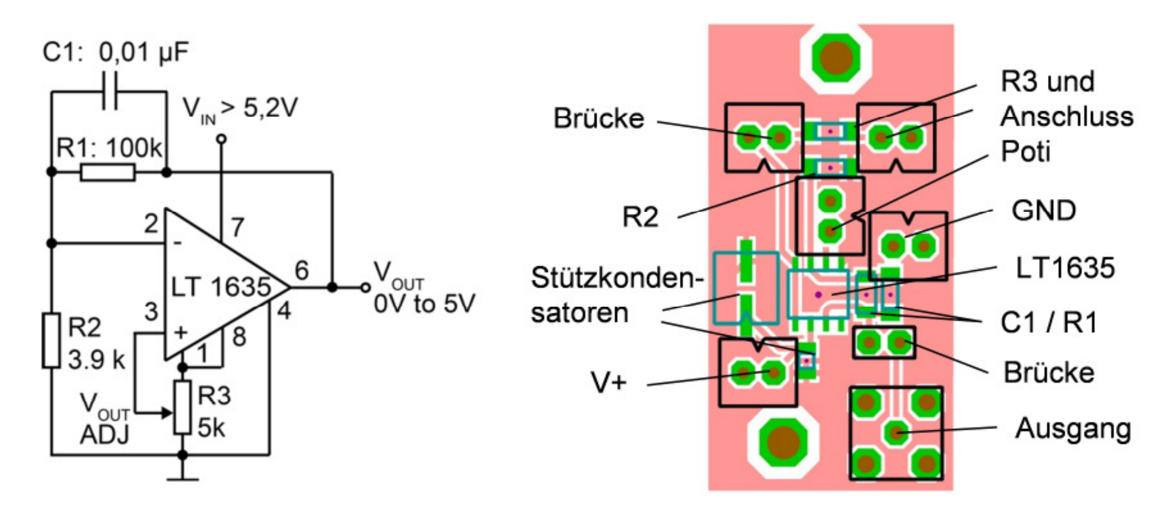


Bild 44: Links: externe Beschaltung nach Datenblatt [LT1635]. Rechts: resultierendes Platinenlayout.

Bild 44 zeigt die resultierende Schaltung aus dem Datenblatt. Das als R3 dargestellte Potentiometer wird in der fertigen Schaltung aus einem 2,2 kΩ Drehpotentiometer und einem 2,7 kΩ Widerstand realisiert, um den Spannungsbereich von 0 bis 2,5 V fein einzustellen. Um die Eigenschaft des Chips möglichst gut zu nutzen, wurden Widerstände auf Metallfilmtechnik mit 1% Toleranz gewählt. Das Potentiometer aus der Tyco M Reihe basiert auf Cermet-Technik mit 10% Toleranz mit jedoch besonders genauer und stabiler Mechanik. Es ergibt sich eine platzsparende Platine der Breite 39 mm und Länge 23 mm, um im Extremfall direkt an der Spitze selbst angebunden zu werden.

Spitzenhalterung

Die Sensorspitze wurde im Betrieb ohne die Rotationskinematik für initiale Integrationsarbeiten von einer federkraftbelasteten Klemme gehalten. Eine Säule aus Invar wurde unter der Kopfplatte der NMM-1 installiert und auf dieser über eine verschiebbare Hülse mit Auskragung ein Klemmmechanismus für Sensorstifte installiert. Die Fe/Ni Legierung InVar 36® hat mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $1{,}6 \cdot 10^{-6}$/K eine sehr geringe thermische Ausdehnung. Die Klemme wurde über eine Zwischenschicht elektrisch isoliert aufgebracht und die Spitzenspannung über die komplette Klemme in den Taststift eingeleitet. Die Isolationsschicht trennt den spannungsführenden Teil vom Rest des Aufbaus, der auf Massepotential liegt. Die Ausführung der Schicht erfolgte über eine Kunststoffplatte. Gegenüber einem keramischen Isolator ist der thermische Ausdehnungskoeffizient zwar erhöht, die Her-

stellung kann jedoch mit üblichen Fräsverfahren erfolgen. Auf der spannungsführenden Seite wird der Taststift über eine Nut ausgerichtet und über einen Federmechanismus mit Hartgummi zur Kraftverteilung fixiert.

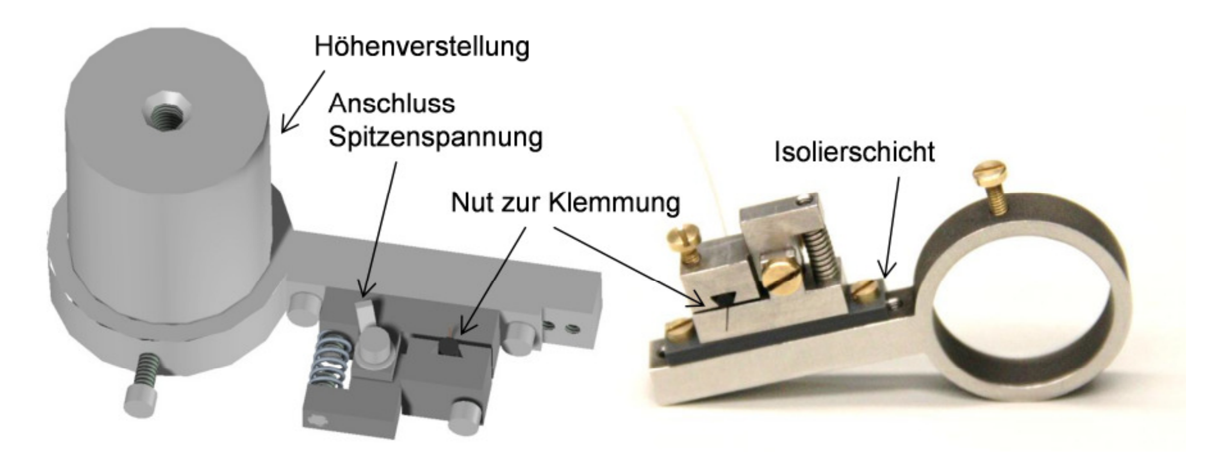


Bild 45: Klemme für Sensorspitzen mit Schaftdurchmessern von 50 µm bis 1 mm

Bild 45 zeigt die letzte Version dieses Mechanismus, der durch eine mittels Drahterosion hergestellte Nut Mikrotaststifte mit einem Schaftdurchmesser von 50 µm klemmen kann.

Verstärker

Der Verstärker zur Umwandlung des Stromflusses im Nanoamperebereich in ein proportionales Spannungssignal im Voltbereich basierte in Version zwei auf dem Operationsverstärker OPA129 von Texas Instruments [OPA129], bzw. ursprünglich von Burr Brown. Besondere Operationsverstärker sind nötig um den geringen Strom überhaupt zu detektieren. Die relevante Kenngröße ist hier der Bias-Strom, welcher aufbau- und fertigungstechnisch bedingt, im Leerlauf in den Eingang hineinfließt oder herausfließt. Ein zu detektierender Strom würde damit entweder reduziert oder erhöht, was zu einem Offset im Ausgangssignal führen würde. Wegen der bereits guten Eignung des OPA129 mit nur 100 fA sollte dieser auch in Version drei unter Verbesserung der Beschaltung weiter behalten werden. Zudem wurde ein zweites Design auf Basis des Operationsverstärkers LMP7721 von National Semiconductor entwickelt, mittlerweile ebenfalls Texas Instruments [LMP7721]. Der Operationsverstärker ist moderner und stellt mit nur 3 fA Bias Strom die Industriereferenz dar.

Der Schaltungskern wurde unter Berücksichtigung üblicher Designrichtlinien für Verstärker vom Prinzip her übernommen, [LENK 1996]. Für die Umwandlung des Stromes in eine proportionale Spannung bei Umwandlungsfaktoren von 10V/nA wird üblicherweise eine stromgesteuerte Spannungsquelle genutzt [KEITHLEY 2004]. Auch die Anwendungshinweise der Chiphersteller empfehlen diese Schaltung, Bild 46. Der Eingang der Schaltung wird am Werkstück kontaktiert und über die Höhe des Feedbackwiderstandes R_F die Ausgangsspannung bestimmt. Es wurden mit einem austauschbaren Steckplatz Widerstände von 100 MΩ, 500 MΩ und 1 GΩ in SMD-Dickschichttechnologie realisiert. Die Toleranz des 100 MΩ Widerstands, der in den späteren Messungen genutzt wurde, liegt bei 5%, die der anderen bei 30%. Widerstände mit geringeren Toleranzen basieren auf anderen Herstellungsverfahren wie Metallfilmtechnik und haben bei diesen Widerstandwerten Abmessungen im zweistelligen Millimeterbereich in THT [ZANDMANN U.A. 2001]. Zu Gunsten kurzer Leitungslängen, mechanischer Integrierbarkeit und leichter Austauschbarkeit mit dem Wechselsystem wurde die SMD-Technik vorgezogen. Der zweite Eingang des Operationsverstärkers, der nichtinvertie-

rende, ist mit Massepotential der Schaltung verbunden. Im Falle des OPA129 ist im Rückkopplungszweig zusätzlich ein Spannungsteiler, welcher den Gesamtverstärkungsfaktor nochmals um das zehnfache erhöht. Dieser Teiler wurde im Layout austauschbar gestaltet.

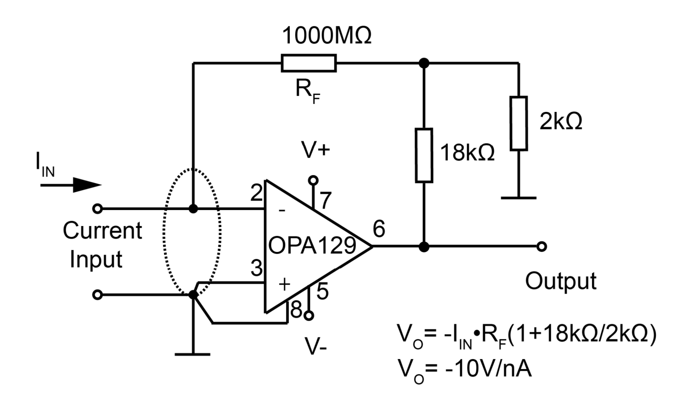


Bild 46: Schaltplan des Verstärkers nach Datenblatt [OPA129]

Der Kern der Verstärkerschaltung wurde um weitere Komponenten ergänzt und deren Effekt mittels Simulation optimiert, Bild 47. Als Simulationsumgebung wurde TINA-TI 7 von Texas Instruments, bzw. ursprünglich von DesignSoft,Inc. eingesetzt. Im Eingangszweig vor dem OPA129, Markierung Nr. 1, wurde ein Tiefpass erster Ordnung eingeplant, um hochfrequente Eingangsstörungen zu reduzieren. Er wurde auf 2 kHz dimensioniert, da keine höherfrequente Veränderung im Sensorsignal durch mechanische Bewegung erwartet wird. Eine austauschbare Konstruktion erlaubt die Realisierung verschiedener Frequenzgänge.

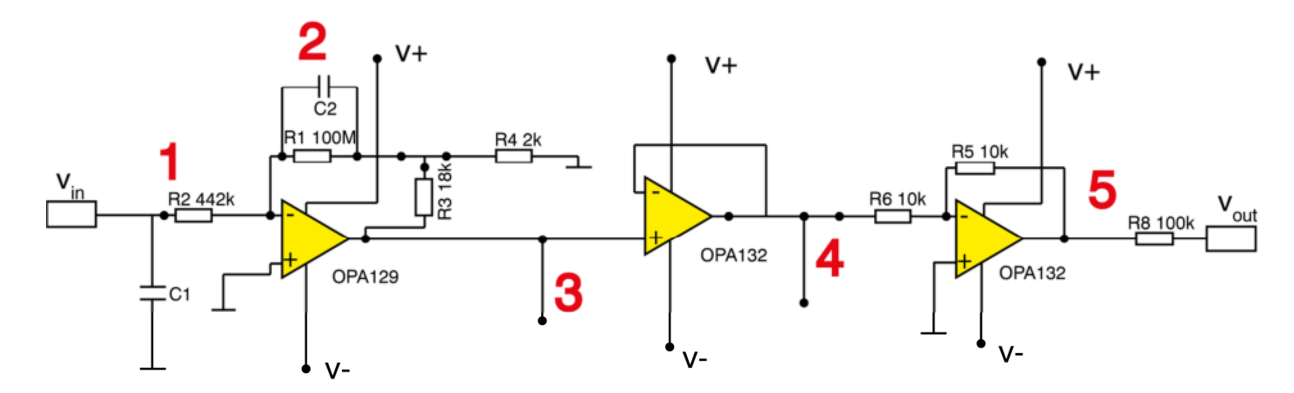


Bild 47: Erweiterung der Verstärkerschaltung um zusätzliche Funktionskomponenten

Markierung Nr. 2 zeigt den Rückkoppelzweig mit dem Feedbackwiderstand. Dieser ist wechselbar ausgeführt, um unterschiedliche Verstärkungen auszuwählen. Im Vergleich zur zweiten Version konnte die Leitungslänge im Feedbackkreis durch SMD Bauteile deutlich reduziert werden. Nach dem Verstärker bei Markierung 3 liegt das Signal als Spannung vor und ist weniger störanfällig. Schaltungsbedingt ist das Signal invertiert und wird mit den folgenden Baugruppen in den positiven Bereich gebracht, [TIETZE U. SCHENK 2002]. Der Operationsverstärker Typ OPA132 von TI ist in Spannungsfolgerschaltung konfiguriert, um Rückwirkungen auf den OPA129 zu vermeiden [OPA132]. In der zweiten Version wurde hier ein LF411 von National Semiconductor genutzt, welcher im Gesamtaufbau zur Schwingung neigte und letztendlich überbrückt wurde. Der OPA132 wurde deshalb hinsichtlich Schwingneigung und auch geringem Rauschen ausgewählt. Nach Markierung vier folgt erneut ein OPA132, der das Signal invertiert. In der fertigen Schaltung wurden die zwei OPA132 als eine Einchiplösung mit zwei integrierten OpAmps realisiert, um Platz und nötige

Versorgungsanschlüsse zu sparen. Zudem können über Jumper beide einzeln aus dem Signalzweig herausgetrennt werden. Zur Spannungsversorgung benötigen die installierten Operationsverstärker eine bipolare 11 V Versorgung. Die Spannung wird direkt am Operationsverstärker mittels 10 µF Elko-Kondensatoren für niederfrequente und 100 nF Keramikkondensator für hochfrequente Störungen auf der Versorgungsspannung gestützt. Die resultierende Platine zeigt Bild 48, die Markierungen sind mit denen aus Bild 47 identisch.

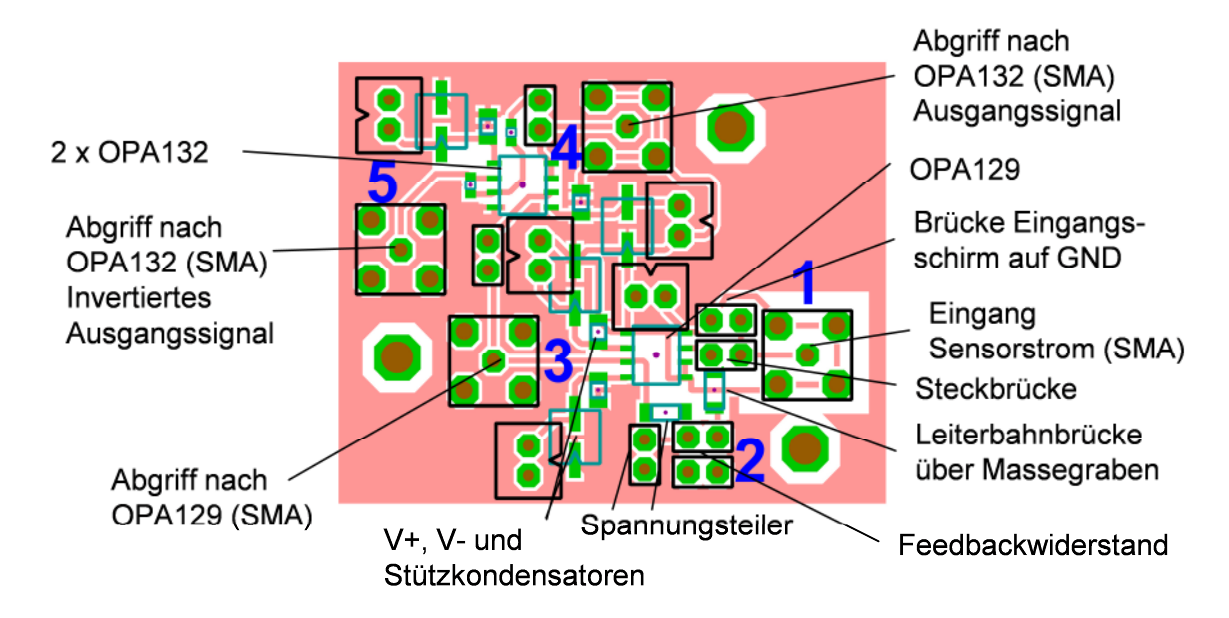


Bild 48: Resultierende Platine der Verstärkerschaltung

Ein wichtiges Layoutkriterium war der Massegraben um den Eingang bei Markierung Nr. 1 herum. Er umfasst den Eingangszweig und wird unter dem OPA129 selbst geschlossen. Der Graben verhindert Leckströme in den Eingangszweig durch die umgebende Platine. Über einen herausgeführten Anschluss des OPV ist der Graben direkt mit dem Chipsubstrat verbunden. Generell wurden alle Leitungszüge möglichst kurz gehalten und mögliche Störquellen vom Tunnelstromeingang distanziert. Der Anschlusspunkt der gemeinsamen Schaltungsmasse wurde zudem so gewählt, dass keine Ausgleichsströme in der Nähe des Einganges fließen. Der LMP7721 wurde auf einer ähnlichen Platine mit dem gleichen Funktionsumfang aufgebaut, er wird jedoch mit einer Versorgungsspannung von 0 bis 5 V betrieben.

5.3.3 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung von bis zu ± 11 V für die Verstärker wurde nach einer Marktrecherche mit dem variablen Regler LP2951ACM von National Semiconductor [LP2950] realisiert. Im Vergleich zu Version 2 mit einem 10 Volt Festspannungsregler 78L10 hat dieser eine Genauigkeit von üblicherweise 0,5 % verglichen mit 5 %, eine Line Regulation von typischerweise 0,03 % verglichen mit 2 %. Die Spitzenspannungsbaugruppe für +5 Volt erhält ihre Versorgung hingegen von einer Festspannungslösung auf Basis des LP2950ACZ-5.0 von National Semiconductor, welcher eine auf 5 Volt fixierte Version des LP2951 darstellt. Um eine positive und eine negative Versorgungsspannung zu realisieren, wurden zwei LP2951ACM ausgangsseitig mit dem Ausgang des einen am Massepotential des anderen gekoppelt. Eingangsseitig werden die LP2951ACM von zwei galvanisch getrennten Quellspannungen versorgt. Diese wurden über Netzteile, bzw. Batteriepacks realisiert.

Masse- und Schirmungskonzept

Zur möglichst effektiven Reduktion elektromagnetischer Störungen wurde ein durchgängiges Masse- und Schirmungskonzept eingesetzt. Leider ist nur eine durchgängige Verwendung von Schirmgehäusen und geschirmten Kabeln nicht ausreichend, da dies nicht gegen induzierte Ausgleichsströme in der Masseleitung hilft. Dies kann vermieden werden, wenn die Schirmung an nur einem Punkt mit dem Massepotential verbunden wird, dem Massesternpunkt. Falls mehrere Baugruppen die Schirmung mit Masse verbinden und durch externe Felder Spannungen im Kabelschirm induziert werden, wird über die mehrfache Anschlusspunkte der Stromkreis geschlossen und Ausgleichsströme fließen über die Masseleitung der Schaltung. Um dies zu vermeiden, wurde ein durchgängiges Schirmungs- und Massekonzept eingehalten. Der Sternpunkt findet sich in der Spannungsreglerbaugruppe direkt an der Zusammenführung der Spannungsreglerausgänge.

Die einzelnen Baugruppen wurden in Stahlblechgehäusen für Hochfrequenzbaugruppen untergebracht. Als geschirmte Verbindungsleitungen wurden je nach Art der Verbindung verschiedene Systeme genutzt. Für alle normalen Kabelverbindungen innerhalb der Schirmgehäuse wurden Koaxialkabel genutzt, die über einen Kontaktpin an der Massefläche der Platine angeklemmt sind. Auf der Platine sind alle Signale durch eine umgebende Massefläche geschützt. Alle kritischen Signale wie Spitzenspannung, Tunnelstrom und Ausgangssignale wurden an die Platine über SMA-Schraubverbinder angeschlossen. Diese Verbinder kamen auch beim Anschluss von Spitzenhalterung und Werkstückkontaktierung an die Schirmgehäuse zum Einsatz. In Version zwei wurden zur Spitzenanbindung BNC-Rastverbinder genutzt. Mit SMA-Verbindern konnte eine weitere Miniaturisierung stattfinden. Die Spannungsversorgung zwischen den Baugruppen erforderte mehrere Adern gleichzeitig, weshalb auf geschirmte 9 Pol D-SUB Verbinder zurückgegriffen wurde. Gegenüber industriellen mehradrigen Steckverbindern waren diese günstiger bei noch vertretbarer Baugröße.

5.3.4 Leistungsevaluation

Mit dieser Überarbeitung ist das elektrische Sensorsystem bereit, in den Rotationsprototypen eingesetzt zu werden. Die zeitfordernden Integrationsarbeiten und Konfigurationsarbeiten des Sensors in die NMM-1 erfolgten zum Teil schon im Vorfeld vor der Montage der Rotationskinematik. Es wurden grundlegende elektrische Tests zur Funktionsprüfung und Bewertung der Leistungsoptimierung durchgeführt. Die Messungen erfolgten im eingebauten Zustand in der NMM-1 bei Leerlauf des Sensors.

Eine Verbesserung der Spitzenspannungsquelle war im Oszilloskop gut sichtbar, sie zeigt in der neuen Version bei einer Ausgangsspannung von 400 mV ein Rauschen von 5,6 mV Spannweite gegenüber dem Wert von 10,8 mV bei der Ursprungsvariante der Schaltung. Von weiterem Interesse war das Ausgangsrauschen des Verstärkers, welches mittels der Analog-Digital-Wandler der NMM-1 erfasst wurde. Der Anschluss an das Werkstück koppelt trotz Schirmung weiterhin Störungen ein, die das Leerlaufsignal überlagern und bei allen Schaltungen zu erhöhtem Rauschen führen. Die Ursprungselektronik auf Basis des OPA129 lieferte bei einer Empfindlichkeit von 1V/nA ein Leerlaufsignal der Spannweite von 18 mV, was 0,18% des nutzbaren Arbeitsbereichs darstellt. Die neue Elektronik mit dem OPA129 lieferte vergleichbare 12 mV, äquivalent 0,12 % des Arbeitsbereiches. Abweichend ist hingegen die Elektronik auf Basis des LMP7721, die 157 mV Spannweite bei 3,14 % des hier auf

5 V begrenzten Arbeitsbereiches ausgibt. Ebenfalls abweichend ist diese Elektronik bei der Auswertung der Offset-Spannung. Offset entsteht bei dieser Schaltung fast ausschließlich durch Leckströme im Eingangskreis auf der Platine und über den Schirm der Zuleitung. Die LMP7721 Schaltung hat hier Offset von 1,06 V, was 20 % des Arbeitsbereiches entspricht. Im Vergleich dazu hat die Ausgangsvariante auf Basis des OPA129 einen Offset von 32,4 mV und die überarbeitete Version sogar nur 3,5 mV. Die Schirmungsmaßnahmen auf der OPA129 Platine und die kürzeren Zuleitungen zeigen somit eine deutliche Verbesserung. Das Verhalten des LMP7721 könnte auf eine Verunreinigung im Eingangskreis deuten und ein Neuaufbau wäre empfehlenswert.

Zudem wurde auch das dynamische Verhalten untersucht. Unter Zuhilfenahme eines 1 GΩ Widerstandes wurde ein Signalwechsel von 0 nA auf 2 nA auf den Verstärkereingang mit einem Rechtecksignal gegeben. Die Verstärker bei 1 V/nA wurden mit den regulären Zuleitungen getestet und der direkte Verstärkerausgang betrachtet. Beim Testsignal lieferte die alte Elektronikversion ein Überschwingen von 20% des Arbeitsbereiches, die erneuerte Version auf Basis des OPA129 hingegen zeigte ein Überschwingen bis in die Versorgungsspannung hinein. Allein der LMP7721 reagierte auf den Signalwechsel ohne Überschwingen mit einer Anstiegszeit von 140 µs. Die erhöhte Empfindlichkeit der neueren OPA129 Variante lässt sich vermutlich auf die kürzeren Zuleitungen mit geringerer Dämpfung zurückführen, jedoch kann die neue Schaltungsversion über die in der Platine vorgesehene Steckplätze für Kondensatoren gezielt gedämpft werden. Dieser Test spiegelt mit Signalanstiegszeiten im Nanosekundenbereich nur eingeschränkt den Praxisfall wider, jedoch zeigt er das tendenzielle Verhalten der Schaltungen. Insbesondere die LMP7721 Schaltung sticht hier positiv heraus und sollte nach Behebung des Offsetproblems näher untersucht werden.

Die praktischen Tests mit der NMM-1 zur Funktionsprüfung der neuen Elektronik verliefen positiv. Bild 49 zeigt auszugsweise einen bidirektionalen Linienscan auf einer geschliffenen Invarfläche. Es wurde eine sphärische Sonde mit 500 µm Durchmesser genutzt. Die Messungen wurden mit älteren Daten der zweiten Version verglichen und auf Plausibilität und Unterschiede geprüft. Untersuchungen zur Auflösung bestätigten die Werte von Hoffmann mit einer lateralen Auflösung unter 200 nm, abhängig von der Spitzengröße, und vertikal unter 1 nm. Zudem wurde über kurze Zeiträume eine bidirektionale Wiederholgenauigkeit ebenfalls unter 1 nm erreicht. Die Vergleichsmessungen bestätigen die bei Hoffmann auf Basis der älteren Elektronik ermittelten Leistungsdaten und die Funktion der neuen Elektronik.

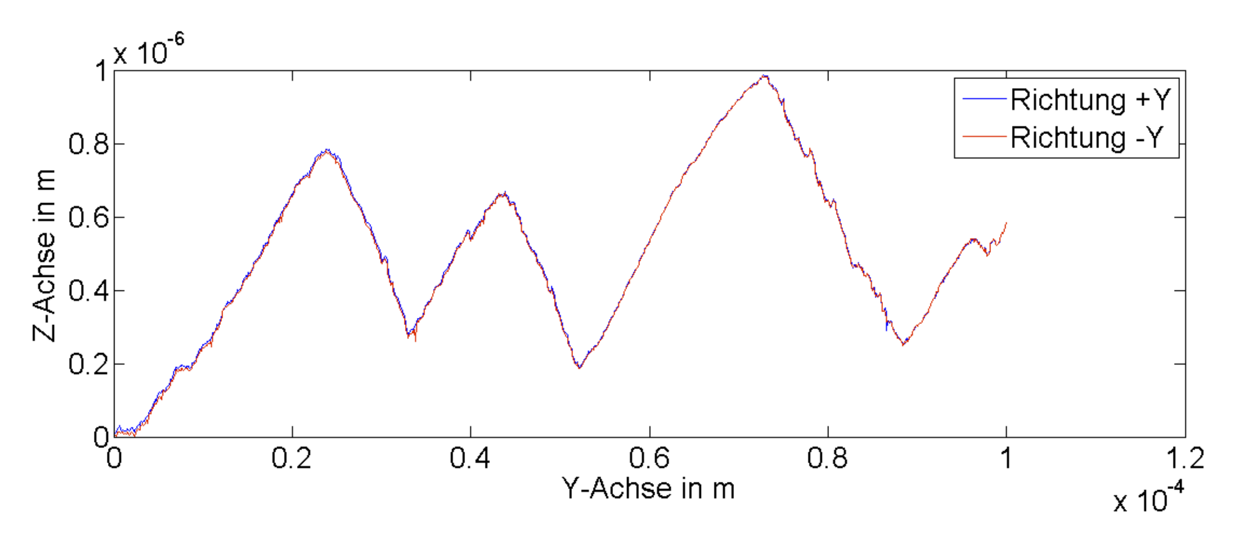


Bild 49: Linienscan auf geschliffenem Invarstab, auch gezeigt in [Hoffmann 2011]

6 Aufbau des Prüfstandes

Nach Festlegung der Rotationskinematik und der Überarbeitung des elektrischen Sensors, galt es die Rotationskinematik aufzubauen und samt Sensor in die NMM-1 zu integrieren.

6.1 Mechanische Integration der Rotationskinematik

Die Verbindung der beiden Drehtische soll, wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, unter einem Winkel von 45° erfolgen, so dass sich die Rotationsachsen bei idealer Ausrichtung schneiden. Festzulegen ist noch der Montageabstand des kleinen Drehtisches in radialer Richtung auf dem großen Drehtisch, R_1R_2, Bild 50. Mit dessen Anstieg resultieren höhere Abstände zum Schnittpunkt der Achsen, R_1S und R_2S. Um die Auswirkung von Winkelabweichungen der Achsen gering zu halten, ist der radiale Abstand der kleinen Achse von der großen Achse gering zu halten. Der minimal mögliche Wert wird jedoch durch die Kollisionsvolumina von NMM-1 und der gestapelten Achsen bestimmt.

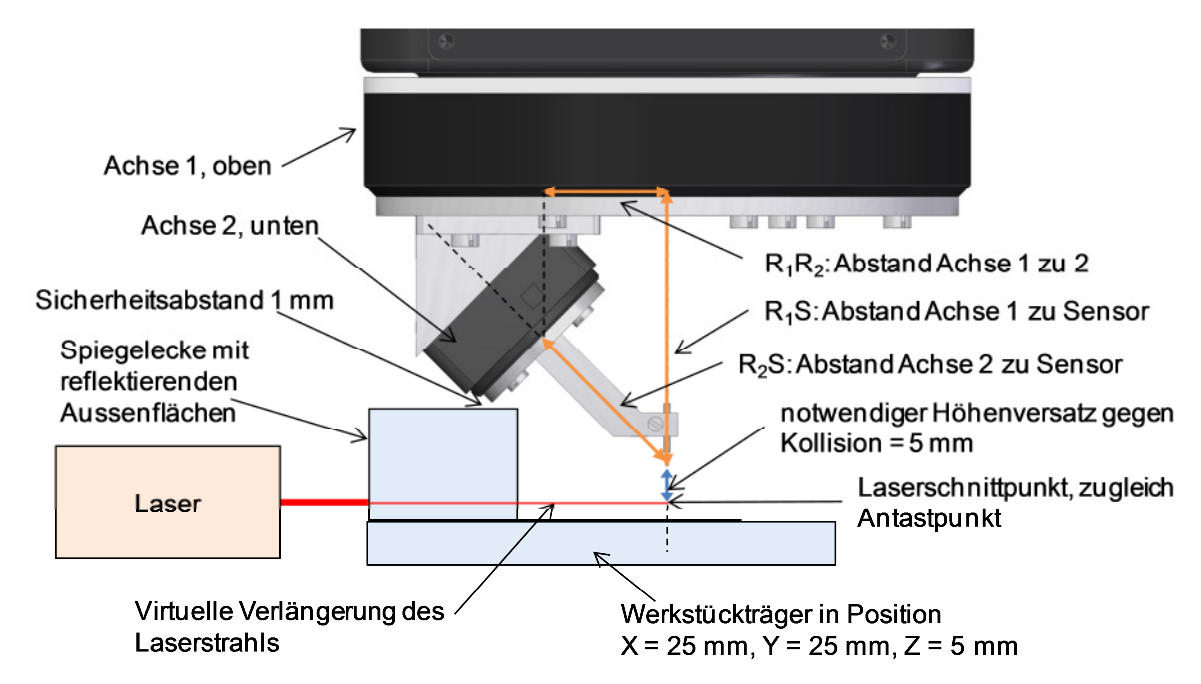


Bild 50: Montageplanung der Rotationskinematik bei voll ausgesteuerten Achsen der NMM-1

Zu berücksichtigen ist der ungünstigste Fall, wenn die Spiegelecke der NMM-1 am höchsten steht und die Lateralachsen ebenfalls voll ausgelenkt sind. Nachdem die Kinematik nicht innerhalb der von der Spiegelecke aufgezogenen Umrandung untergebracht werden kann, muss sie oberhalb installiert werden und durch einen auskragenden Arm den Sensor in den Arbeitspunkt bringen. Nach Bild 50 wurde als Kompromiss die Distanz R_1S zu 43,6 mm und R_2S zu 29,3 mm gewählt, wobei der Sensorarbeitspunkt 5 mm über dem Abbepunkt liegt. Die Berechnungen in Kapitel 5.2.3 basieren auf diesen Werten. Mit Festlegung dieses Abstandes wurde eine notwendige Vergrößerung des metrologischen Rahmens der NMM-1 berechnet. Es erfolgte eine Erhöhung der Zerodurkopfplatte um 76 mm durch Distanzhülsen aus InVar, Bild 51.

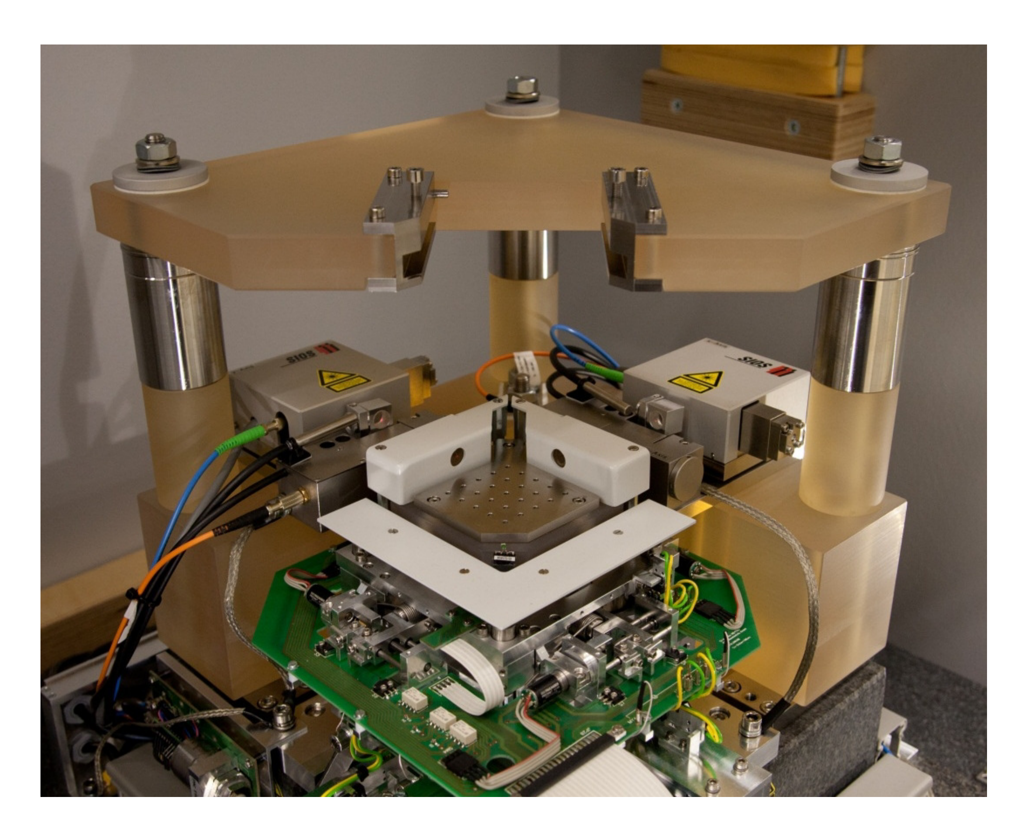


Bild 51: Vergrößerter Metrologierahmen mit nicht belegtem Sensorwechselmodul

Die Verbindungsteile der Drehachsen wurden ebenfalls soweit sinnvoll aus InVar gefertigt, um Längenänderungen durch thermische Effekte zu minimieren. Hierzu gehört an oberster Stelle der Moduleinschub in die NMM-1. Darunter ist die Aerotech Achse installiert, die selbst aus Aluminium gefertigt ist und über eine kreisrunde Adapterplatte die zweite Achse trägt. Um unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten auf dieser großen Fläche zu vermeiden, wurde die Adapterscheibe aus Aluminium gefertigt. Es folgt ein Adapterblock, der die zweite Drehachse unter einem Winkel von 45° befestigt und wieder aus InVar besteht. Der Adapterblock kann zur Ausrichtung über Lochmuster in der Adapterplatte verschoben werden. Es folgt die Smaract Achse aus Titan, die die Tasterhalterung aus InVar trägt. Diese hat an ihrem Ende eine um 45° gewinkelte Klemmhalterung für Taststifte von 1 mm Durchmesser. Eine konstruktive Besonderheit liegt in den Hohlachsen der Tasterhalterung, des 45° Adapters und der Adapterscheibe. Neben einer zentrischen Kabelführung erlauben sie einen optischen Durchgang der Achszentren zum Sensorarbeitspunkt. Dies ermöglicht eine axiale Beleuchtung sowie auch eine axiale Beobachtung. Neben einer Überwachung des Messvorgangs kann dadurch eine messtechnisch gestützte Positionierung des Sensors in den Achsschnittpunkt erfolgen. Es kann z.B. durch ein Bildverarbeitungssystem die Zentrizität des Sensors zu den Aperturen bestimmt werden.

Bild 52 zeigt das installierte Modul sowie eine Nahaufnahme ohne installiertes Werkstück. Erwähnenswert ist die Verkabelung der bewegten Smaract Achse. Da aufgrund des breiten Anschlusssteckers keine Kabelführung durch die 10 mm Apertur der Aerotech Achse möglich war, wurde die Verbindungsleitung nach mehreren Experimenten als Schlaufe aus dem Arbeitsvolumen der NMM-1 herausgeführt und beweglich auf Höhe der Zerodurplatte aufgehängt. Aufgrund des begrenzten Rotationsbereichs der Aerotech-Achse von 180° stellte sich dies als ausreichend heraus.

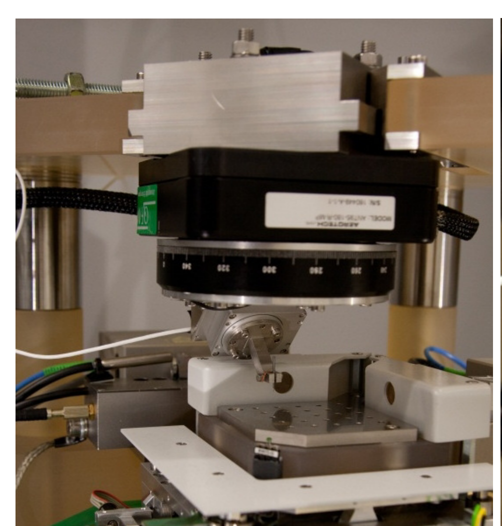



Bild 52: In NMM-1 installierte Rotationskinematik

6.2 Elektrische und informationstechnische Integration

Neben der mechanischen Integration bedurfte es einer elektrischen und informationstechnischen Integration, um von einer gemeinsamen Ablaufsteuerung aus die Messung durchzuführen und NMM-1 sowie die Drehkinematik anzusteuern. Auf elektrischer Seite ist die Anbindung der Drehachsen jeweils durch den Hersteller vorgegeben.

Das Smaract System wird über eine USB Verbindung angesteuert und Bewegungskommandos können über das mitgelieferte graphische Interface „Precision Tool Commander“ abgesetzt werden. Zur Einbindung in eigene Systeme kann das „Modular Control System“ des Smaract Systems über mitgelieferte DLLs (Dynamic Link Libraries) angesprochen werden, auf die wiederum über Befehlsbibliotheken in der Programmiersprache C zugegriffen wird. Die Befehlsbibliotheken enthalten umfangreiche Möglichkeiten zur Konfiguration des Achsverhaltens sowie zur Ansteuerung und Auslesen der Achsdaten. Diese Softwareschnittstelle muss von der Gesamtablaufsteuerung durch Mathworks Matlab angesteuert werden. Ein Zugriff auf C Bibliotheken inklusive Übergabe und Rückgabe von Werten kann in Matlab über sogenannte MEX Binärdateien, äquivalent für „MATLAB executable“ realisiert werden. Es werden dazu gerätespezifische Programmroutinen in C geschrieben und Ein- und Ausgabewerte als Übergabeschnittstellen definiert. Nach Kompilierung mittels Matlab kann die C-Programmroutine wie eine Matlabfunktion aus Matlab heraus aufgerufen werden.

Beim Aerotech System erfolgt die Ansteuerung über eine Netzwerkschnittstelle und das TCP/IP Protokoll. Zur Ansteuerung steht die Anwendung „Motion Composer Suite“ zur Verfügung, die neben einer grafischen Steueroberfläche die Erstellung von Bewegungsroutinen mit verschiedenen Achsen durch die hauseigene Skriptsprache „Aerobasic“ erlaubt. Genauso wie das Smaract System ist jedoch auch eine C Bibliothek verfügbar, die nach bereits beschriebenem Schema in Matlab eingebunden werden soll. Eine weitere mitgelieferte Anwendung von Aerotech ist das „Digital Scope“, welches die Aufzeichnung von Achsparametern wie Antriebsstrom und Winkelpositionsabweichung ermöglicht. Hiermit konnte im Rahmen der Inbetriebnahme vom Hersteller die Positionsregelung der Achse auf ihre Einbaulage und die installierte Last abgestimmt werden.

6.2.1 Erstellte Programmroutinen

Für die Ansteuerung der Drehtische wurden mehrere Funktionsabläufe in C abgebildet und in eine Matlab Funktion umgesetzt. Die wichtigsten Befehle ergaben sich wie folgt:

Homing: Bestimmung der Achsposition im Achskoordinatensystem und anschließende Adressierung der Winkelposition 0°. Die Aerotech Achse fährt hierbei in den negativen Winkelbereich bis der Endlagenschalter bei -90° erreicht ist und fährt dann 0° an. Die Smaract Achse erkennt die Nullposition ohne sichtbare Bewegung, wenn sie zuletzt in Nulllage deaktiviert wurde. Falls sie in einer anderen Winkelstellung deaktiviert wurde, wird eine Referenzfahrt in positiver Winkelrichtung durchfahren, bis die Nullmarke erreicht ist. Da die Smaract-Achse im Drehwinkel und der Anzahl der Rotationen nicht begrenzt ist, muss dies vom Anwender berücksichtig werden. Aus Sicherheitsgründen wurde der Spitzenspannungsanschluss durch die Smaract Achse hindurch in Überlänge ausgeführt, um mehrere Umdrehungen ohne Beschädigung durchführen zu können.

Position auslesen: Abruf der aktuellen Winkelstellung der Achse anhand der integrierten Winkelencoder. Die Aerotech-Achse ist mechanisch auf ± 90° gesperrt und arbeitet mit einem absoluten Koordinatensystem von gleichem Bereich. Die Smaract-Achse liefert hingegen einen Winkel von 0° bis 360° und die Anzahl der vollständigen Umdrehungen. Eine Rückgabe erfolgt immer mit positivem Winkel, beispielsweise 270° und minus eine Umdrehung, was bei der Aerotech-Achse -90° entsprechen würde.

Absolute Winkelposition ansteuern: Diese essentielle Funktion dreht die Achse zur gewünschten Winkelposition in absoluten Koordinaten. Als einheitliches Format werden für beide Achsen absolute Winkel von 90° bis -90° genutzt und funktionsintern in das Zielsystem umgerechnet. Der volle Winkelbereich der Smaract Achse wird dadurch nicht genutzt, wird für das Rotationsprinzip aber auch nicht benötigt. Nach Übergabe des Zielwinkels θ_{Ziel} und der Rotationsgeschwindigkeit führen beide Routinen eine Sicherheits- und Plausibilitätsprüfung durch, um die versehentliche Eingabe von Winkeln außerhalb des ± 90° Fensters abzufangen. Nach einer Initialisierung von Achsparametern erfolgt die Verbindung zum Achscontroller. Die Aerotech Achse kann direkt mit den Eingabewerten zur Rotation angewiesen werden. Bei der Smaract Achse hingegen muss erst die anzusteuernde Position θ_{Steuer} berechnet werden, da mitgelieferte Controllerbefehle bei einer absoluten Adressierung immer in positiver Winkelrichtung drehen. Um dies zu umgehen, werden Befehle zur relativen Bewegung in Anzahl der Winkelschritte und Winkelrichtung genutzt. Für deren zuverlässige Ausführung bei beliebigen Eingangswerten wird zuerst die aktuelle Winkelposition θ_{ist} ausgelesen und nach folgendem Schema der Zielvektor bestimmt:

$$\begin{aligned} &\theta_{ist} < 90° \quad \rightarrow \quad \theta_{Steuer} = \theta_{Ziel} - \theta_{ist} \\ &\theta_{ist} > 270° \quad \rightarrow \quad \theta_{Steuer} = \theta_{Ziel} + (360° - \theta_{ist}) \\ &90° \leq \theta_{ist} \leq 270° \quad \rightarrow \quad \theta_{ist}\ unzulässig \end{aligned} \tag{20}$$

Nach Grenzwertprüfung der errechneten Werte, bzw. Prüfung der rückgelieferten Winkelposition, erfolgt das Bewegungskommando. Beide Achsen trennen die Verbindung zum Computer nach diesem Schritt und liefern einen Rückgabewert. Im Falle eines Fehlers bei der Befehlsabarbeitung wird der Fehlercode zurückgegeben, ansonsten der Wert 0. Das ausführende Rahmenprogramm in Matlab reagiert auf den Rückgabewert und stoppt gegebenen-

falls alle Achsbewegungen. Dies erfolgt z.B. bei nicht durchgeführter Referenzfahrt einer Achse oder der Eingabe eines ungültigen Zielwertes.

6.2.2 Ansteuerung eines kartesischen Rotationswinkels

Nach Verbindung der beiden einzelnen Achsen zu einer gestapelten Kette wird eine Funktion benötigt, um über die Rotation der einzelnen Achsen einen bestimmten Winkel des Sensors im kartesischen Koordinatensystem der NMM-1 zu erreichen. Wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, führt die Rotation der Smaract Achse zu Rotationskomponenten des Sensors um X und Y. Die Aerotech Achse rotiert um die Z Achse und verschiebt dabei die Rotationskomponenten um X und Y, um beispielsweise bei einem Scan entlang der X Achse eine Rotation rein um Y zu erhalten. Gesucht wird hierbei eine Funktion, um zu einem Rotationswinkel in kartesischen Koordinaten die korrespondierenden Werte in den Zylinderkoordinaten der Drehachsen zu ermitteln. Zur rechentechnischen Abbildung wird der im Folgenden vorgestellte inverse Ansatz genutzt.

Ausgangslage ist die Nullstellung beider Drehachsen mit Ausrichtung der auskragenden Sensorhalterung entlang der Y Achse der NMM-1 mit dem Vektor $\vec{u}$ als Drehachse der Smaract Einheit und Vektor $\vec{v}$ als Drehachse des Aerotech Tischs, Bild 53. Der Sensor wird als Vektor $\vec{S}$ auf den Arbeitspunkt entlang der Z Achse dargestellt. Alle Vektoren können mit einer Norm von eins angenommen werden, da nur Winkel betrachtet werden.

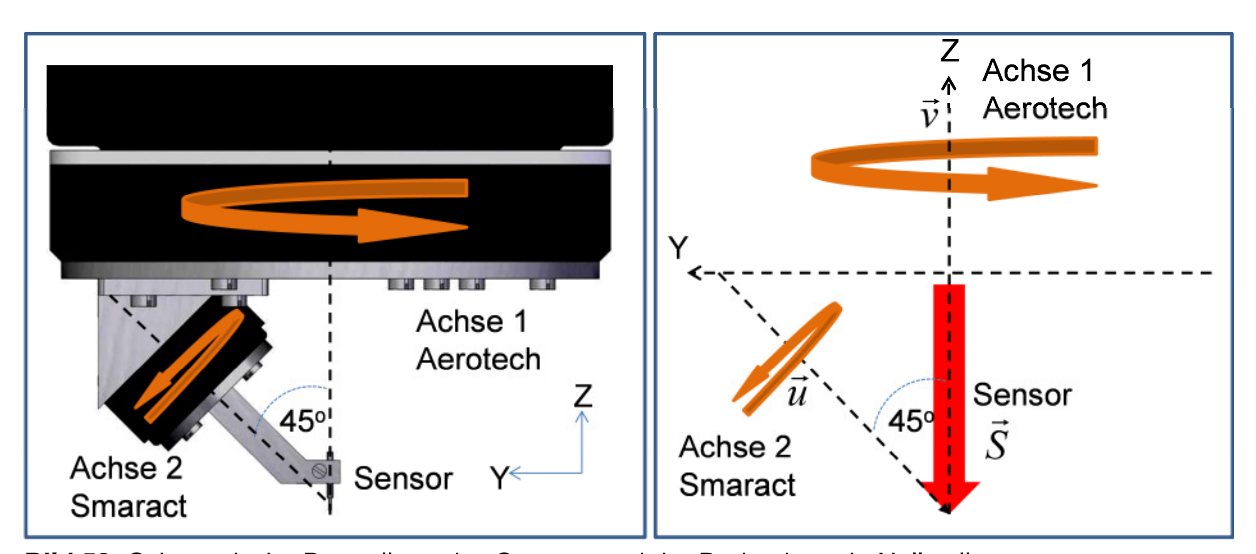


Bild 53: Schematische Darstellung des Sensors und der Drehachsen in Nullstellung

In einem ersten Schritt wird $\vec{S}$ um $\vec{u}$ gedreht mit dem Winkel θ.

$$\vec{S}_1' = \vec{S} \times \mathbf{R}_1(\vec{u}, \theta) \tag{21}$$

Hierbei ist $\mathbf{R}_1$ die Rotationsmatrix um $\vec{u}$ mit dem Winkel θ, $\vec{S}_1'$ ist der resultierende gedrehte Sensorvektor, [HORNEGGER U.A. 2011]. Der Rotationsvektor $\mathbf{R}_1$ ergibt sich allgemein nach Gleichung (22) zu:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} u_1^2 + (1-u_1^2)\cos\theta & u_1u_2(1-\cos\theta) - u_3\sin\theta & u_1u_3(1-\cos\theta) + u_2\sin\theta \\ u_1u_2(1-\cos\theta) + u_3\sin\theta & u_2^2 + (1-u_2^2)\cos\theta & u_2u_3(1-\cos\theta) - u_1\sin\theta \\ u_1u_3(1-\cos\theta) - u_2\sin\theta & u_2u_3(1-\cos\theta) + u_1\sin\theta & u_3^2 + (1-u_3^2)\cos\theta \end{pmatrix} \tag{22}$$

Bei grafischer Betrachtung erfolgt nach Bild 54 der Übergang von Zustand A zu B.

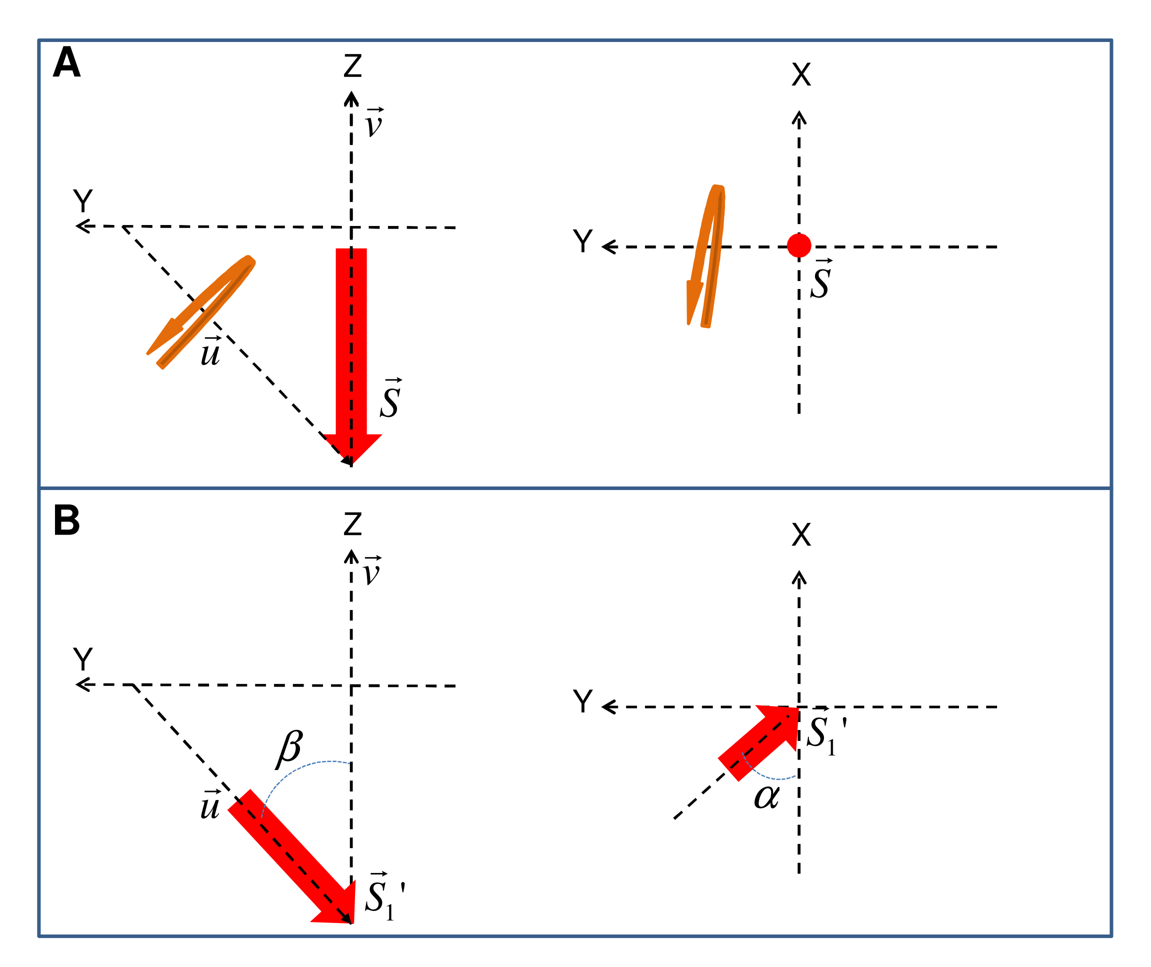


Bild 54: Sensor vor und nach Drehung um $\vec{u}$

Der Winkel β zur Z-Achse, äquivalent der Neigung zur XY Ebene lässt sich nach

$$\beta = \arccos(\vec{S}_1' \cdot \vec{v}) \tag{23}$$

aus dem Skalarprodukt von $\vec{S}_1'$ und $\vec{v}$ berechnen. Für das Beispiel einer Rotation nur um Y wäre β der resultierende Neigungswinkel um Y, wenn die noch vorhandene Komponente um X, also α ausgeglichen wird. Zur weiteren Berechnung kann deshalb eine zweidimensionale Projektion der Vektoren in die XY Ebene herangezogen werden. Die Projektion $\vec{S}_1'$ auf XY, $\vec{S}_1'_{XY}$ ergibt sich zu

$$\vec{S}_1'_{XY} = (\vec{S}_1'_X, \vec{S}_1'_y) \tag{24}$$

Der Winkel α ergibt sich über das Skalarprodukt dann zu

$$\alpha = \arccos(\vec{S}_1'_{XY} \cdot i_x) \tag{25}$$

mit i_x als Einheitsvektor entlang der X Achse. Für den Fall einer gewünschten Rotation nur um die Y-Achse wäre mit α der notwendige Kompensationswinkel für die Aerotech Achse ermittelt. Um nun nach diesem Schema effizient den Rotationswinkel θ der Smaract Achse und α der Aerotech Achse für einen Sensorrotationswinkel zu berechnen, wurde eine Lookup Tabelle genutzt. Diese kann über die beschriebene Systematik erstellt werden, indem der

Eingangswinkel θ in z.B. 0,001° Inkrementen durchgestuft, β berechnet und daraus α für eine gewählte Zielrotation um Z bestimmt wird. Eine Suche über die Lookup Tabelle nach dem jeweils benötigten β liefert die zugehörigen Rotationswinkel der beiden Drehachsen. Da bei der gestapelten Rotationskinematik eine begrenzte Anzahl an Winkelschritten zu keinen Nachteilen führt, kann zu Gunsten der Rechenkomplexität dieser Ansatz ohne Bedenken genutzt werden. Die resultierende Umsetzung der Achsdrehwinkel für einen Zielwinkel in kartesischen Koordinaten lässt sich in Bild 55 darstellen.

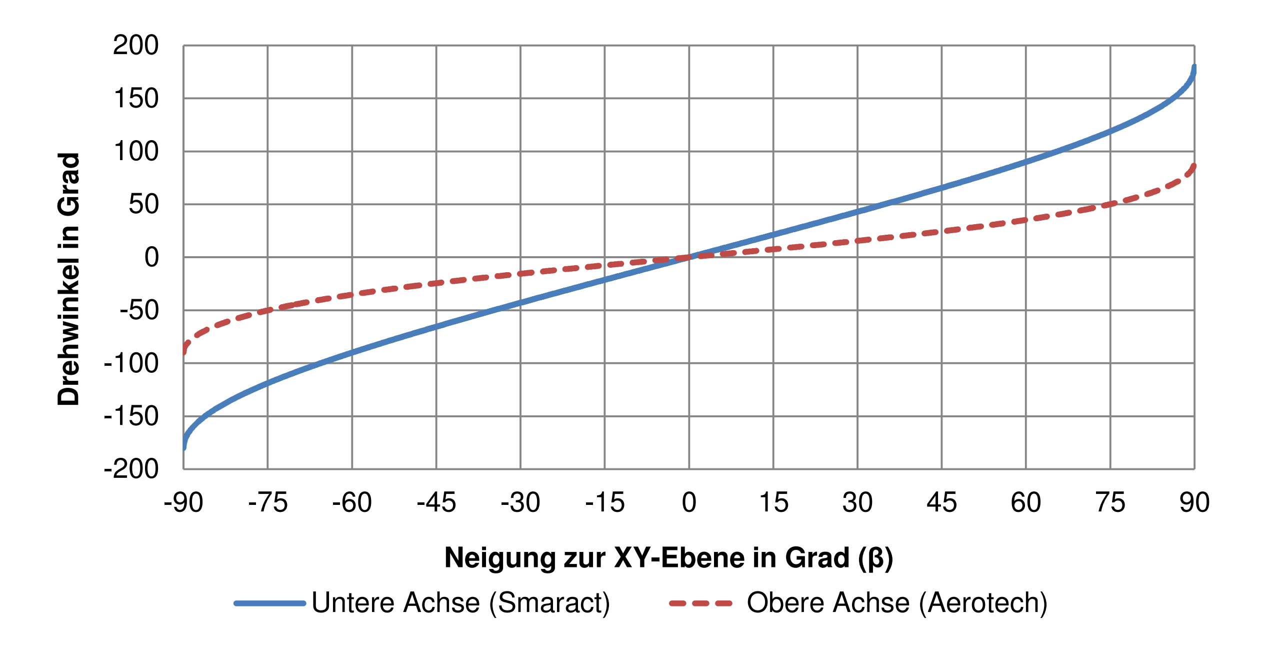


Bild 55: Resultierender Rotationswinkel der Drehachsen für eine Rotation um Y

Mit der Lookup Tabelle wurde eine Matlabfunktion erstellt, die bei einer festen Rotationsrichtung um Y einen Zielwinkel β benötigt und damit die Drehachsen über bereits beschriebene Routinen einzeln ansteuert.

6.3 Integration elektrischer Sensor

Es folgte die mechanische Integration des elektrischen Sensors in die Rotationskinematik und die Einspeisung des Sensorsignals in die NMM-1.

6.3.1 Elektromechanische Integration

Die Sensorsonde, bzw. deren Arbeitspunkt soll zentriert in den Schnittpunkt der Drehachsen gelegt werden. Zur Vereinfachung der Konstruktion wurde im Vorfeld der Schaftdurchmesser der Sonden auf 1 mm festgelegt. Wie in Bild 56 dargestellt, wurde erneut auf einen Klemmmechanismus zurückgegriffen. Er hält die Sonde im 45° Winkel zur Montagefläche der Smaract-Achse. Die Sonde kann beim Einsetzen entlang der Führung bewegt werden und muss durch den Bediener in den Sollpunkt geschoben werden. Die elektrische Kontaktierung der Spitze erfolgt durch den hohlen Schaft des Auslegers. Da die Montageplatte der Smaract Achse selbst schon isoliert ausgeführt ist, war keine zusätzliche Isolation der Spitzenspannung vom restlichen Aufbau notwendig.

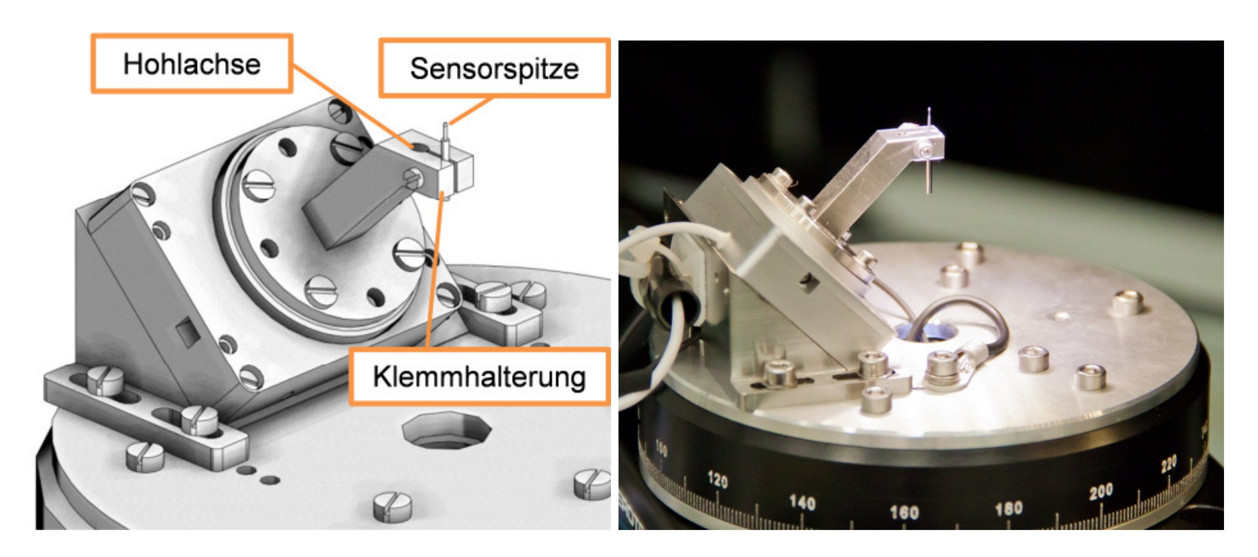


Bild 56: Links: Ausleger mit Sensorhalterung im CAD-Modell. Rechts: Realer Aufbau und elektrische Kontaktierung.

Auf der anderen Seite der Wirkzone, dem Werkstück, erfolgt die elektrische Kontaktierung des Verstärkereingangs. Das Werkstück ist hierzu auf einer leitfähigen Trägerplatte montiert und mit Silberleitlack fixiert. Die Trägerplatte wiederum wird elektrisch isoliert von der NMM-1 auf der Spiegelecke montiert. Da sich das Werkstück bewegt, wurde die Kontaktierung an der Trägerplatte mit einer hochflexiblen Koaxialleitung realisiert, die zugspannungsfrei an den Verstärker gekoppelt wurde. Dieser ist auf der Kopfplatte, bzw. daneben auf Höhe der Spiegelecke installiert. Von Interesse ist die Verbindung zwischen Spiegelecke und Trägerplatte. Diese wurde in den Voruntersuchungen durch eine seitliche Klemmung auf die Spiegelecke realisiert. In Messungen die sich über den kompletten Arbeitsbereich erstreckten, konnte wiederholt eine Drift der Position der erfassten Merkmale von mehreren 100 nm in Richtung der angeschlossenen Verstärkerklemme festgestellt werden. Diese Problematik durch mechanischen Zug konnte bei der letzten Modernisierung der NMM-1, die vor der Integration der Drehachsen erfolgte, gelöst werden. Die Trägerplatte wurde nun direkt auf eine Lochrasterplatte aus InVar geschraubt, die selbst mit der Spiegelecke verschraubt war.

Elektrische Abschirmung von Störfeldern

Zu beachten war zur Aufrechterhaltung eines durchgängigen Schirmungskonzepts die Abschirmung gegenüber elektromagnetischen Störfeldern. Hauptstörquelle ist eine 50 Hz Schwingung, die von netzspannungsführenden Leitern ausgeht sowie auch von daran betriebenen Netzteilen und deren Ausgangsleitungen. Alle nicht geschirmten metallischen Flächen des Verstärkereingangskreises wirken als parasitäre Antenne und führen zu einem Störsignal durch die hohe Empfindlichkeit des Verstärkers von bis zu 10 V/nA. Bei unzureichender Abschirmung des Eingangskreises werden Störungen bis zum Vollausschlag des Sensorsignals erreicht. Als Schirmungsmaßnahme galt es, ungeschirmte Flächen zu reduzieren und die Ausbreitung der Störfelder zu verhindern. Um den Verstärkereingang möglichst gut zu schützen, wurde unter dem Werkstück die Lochrasterplatte auf der Spiegelecke auf Erde gelegt, dem Bezugspotential der Sensorelektronik. Der ursprüngliche potentialfreie Zustand der Platte bietet gegenüber einem definierten Zustand eine deutlich geringere Abschirmung. Außerdem wurden oberhalb des Werkstücks das Gehäuse der Smaract-Achse und der Aerotech-Achse sowie die kreisrunde Adapterplatte auf Masse gelegt. Zusätzlich wurde die isolierte Trägerplatte des Werkstücks verkleinert, so dass sich alle ungeschirmten Metallflächen des Verstärkereingangs innerhalb der Rasterplattenfläche befinden.

Einspeisung des Sensorsignals in die NMM-1

Auf elektrischer Seite galt es noch, das Sensorsignal in das KMG einzuspeisen. Der DSP der NMM-1 stellt hierfür mehrere Analogeingänge zu Verfügung, die einen Spannungsbereich von ± 10 V digitalisieren können. Es kommt ein Analog-Digital-Umsetzer mit 16 Bit und einer Abtastfrequenz von 6,25 kHz zum Einsatz, was einer Auflösung von 0,3 mV entspricht. Aus dem Sensorverstärker wurde das Ausgangssignal über eine 9 polige DSUB Buchse an den DSP angeschlossen und zusätzlich ein zweiter Ausgang auf ein Oszilloskop gelegt, um dem Bediener eine schnelle Zustandskontrolle zu ermöglichen.

6.3.2 Softwareseitige Integration

Nach Erfassung des analogen Sensorsignals erfolgt die weitere Signalverarbeitung im DSP. Während den Arbeiten wurde bei einer Modernisierung die DSP Einheit ausgetauscht, was zu einem veränderten Vorgehen bei der Sensorkonfiguration und den verfügbaren Befehlssätzen führte. Ein grundlegender Unterschied ergab sich in der Fähigkeit anstatt nur 1D-Sensoren auch 3D-Sensoren zu verwenden und damit verbunden eine Abstandsregelung in drei Dimensionen durchzuführen. Soweit nicht anders vermerkt, wird im Folgenden die Sensorintegration mit der 3D-fähigen DSP Einheit beschrieben. Die Signalverarbeitung ist vom Aufbau für einen taktilen Sensor ausgelegt, der bis zu sechs auslenkungsproportionale Ausgangssignale sowie Positionssignale liefert. Über ein Polynom dritter Ordnung werden die digitalisierten Eingangswerte in eine Auslenkung für die X, Y und Z Achse umgerechnet. Die Auslenkungen werden über die Federkonstanten des Tastsystems in eine korrespondierende Antastkraft umgerechnet, die für die Arbeitspunktregelung und Maximalwertüberwachung genutzt wird. Wenn anstelle eines taktilen 3D Sensors ein 1D Sensor oder ein nicht-taktiles System installiert werden soll, muss der Anwender eine Adaption an das beschriebene Schema durchführen und äquivalente Parameter berechnen. Für den elektrischen Sensor wird analog der Simulation eine Antastung in Z-Richtung d_z angenommen, womit die Polynomialkoeffizienten für X- und Y-Auslenkung alle null sind. Es resultiert folgender Ansatz, mit a_0 gleich dem digitalisierten Sensorsignal im Bereich [-32767;32768] äquivalent [-10 V; 10 V]:

$$d_z = k_{dz0} + k_{dz1} \cdot a_0 + k_{dz2} \cdot a_0^2 + k_{dz3} \cdot a_0^3 \qquad (26)$$

Für die Positionsregelung wurde aufgrund des exponentiellen Signalverlaufs eine maximale Sensoraussteuerung bei 90% des Arbeitsbereiches eingestellt und ein Sollarbeitspunkt bei 10% bis 20% Signalstärke. Die Ausgangsbasis für die Polynomberechnung war die Aufzeichnung des Sensorsignals während der Werkstückannäherung. In diese Rohdaten wurde über Fittingalgorithmen eine Ausgleichsfunktion dritter Ordnung gelegt und die ermitteln Parameter k_{dz0} bis k_{dz3} in der Gerätekonfiguration abgelegt.

6.3.3 Scanning und Einzelpunktantastung

Für den Betrieb zur Oberflächenerfassung konnten zwei Betriebsarten genutzt werden, Scanning und Einzelpunktantastung, [DIN EN ISO 10360-1 2003]. Im scannenden Betrieb bleibt der Sensor kontinuierlich im Arbeitsbereich und nimmt Punkte in äquidistanten Abständen auf. Die Abstandsregelung der NMM-1 führt durch Kenntnis des Sensorpolynoms

die Höhenposition des Werkstücks derart nach, dass der Sensor in seinem konfigurierten Arbeitspunkt bleibt. Im Vergleich zu anderen Sensoren in der NMM-1 mit Arbeitsbereichen von mehreren Mikrometern hat der elektrische Sensor einen sehr kleinen Arbeitsbereich bis hin zu wenigen Nanometern. Eine Anpassung der Standardreglerkonfiguration war deshalb notwendig, da sonst durch Übersteuern der Arbeitsbereich wiederholt verlassen wurde, sowohl vom Werkstück weg, als auch in die Kollision. Im Kollisionsfall lud sich die parasitäre Kapazität im Eingangskreis des Verstärkers auf Spitzenspannung auf und der Sensor lieferte mehrere Millisekunden lang Vollausschlag, bis die Kapazität wieder entladen war. Mit Einführung der 3D-DSP Einheit kam zusätzlich eine neue Betriebsart hinzu, eine Möglichkeit zur Einzelpunktantastung. In diesem schaltenden Betrieb ist der Sensor nur kurzzeitig in seinem Arbeitspunkt, er wird an das Werkstück angenähert, bis er seinen Schwellwert erreicht und eine oder mehrere Koordinaten gespeichert werden. Dies kann auch ohne Rückgriff auf eine Positionsregelung über den Sensor erfolgen. Insbesondere bei Werkstücken mit Abmessungen im Millimeterbereich, wie sie bei der Implementation des Rotationsprototyps vorkommen, erlaubt diese Betriebsart einen signifikanten Zeitgewinn gegenüber einer scannenden Messung. Anstatt durch Scanning auf eine geringe Scangeschwindigkeit wie z.B. 1 µm/s begrenzt zu sein, kann bei Einzelpunktantastung der Wechsel zum nächsten Punkt mit hoher Geschwindigkeit, z.B. 1 mm/s erfolgen, bei frei wählbarem Punktabstand. Der Vorteil von Scanning zeigt sich hingegen bei hoher lateraler Punktdichte von wenigen Nanometern.

6.4 Ablaufsteuerung

Zur vollständigen Integration von Drehachsen, Sensor und Nanokoordinatenmessgerät galt es noch, diese einzeln funktionsfähigen Komponenten in eine gemeinsame Ablaufsteuerung zu bringen. Auch die NMM-1 wird über USB angesteuert und bietet mehrere Varianten Kommandos entgegenzunehmen. Die leistungsfähigste Variante besteht in einer mitgelieferten Toolbox, mit der Gerätekommandos direkt in Matlab aufrufbar sind. Durch diesen gemeinsamen Nenner wurde die übergeordnete Ablaufsteuerung in MATLAB realisiert. Die Ablaufsteuerung führt insbesondere folgende Funktionen aus:

- Senden von Gerätekonfigurationen, Kapitel 6.3.2
- Aufruf von Positionier- und Messbefehlen, Kapitel 6.2.1
- Empfang und Übergabe von Koordinaten und Rückgabewerten
- Koordinatentransformationen, Kapitel 7.1.1
- Datenspeicherung
- Aufruf von Strategien, Kapitel 4.3
- Durchführung und kontrollierte Beendigung sich wiederholender Vorgänge

Die Ablaufsteuerung setzt im Prinzip den Simulatorkern, Kapitel 4.2, in einer Hardwareumgebung um. Insbesondere die Einbindung der Strategien und deren diskrete Berechnungsvorschriften sind hier zu nennen.

Über den Prototypen und eine Zwischenversion auf Basis einer manuellen Drehachse wurde in [SCHULER U.A. 2012B] berichtet.

7 Korrektion systematischer Abweichungen der Rotationskinematik

Zur Steigerung der Genauigkeit der Rotationskinematik sollen die auftretenden Positionsabweichungen reduziert werden. Die Abweichungen lassen sich generell in erfassbare systematische Anteile, nicht erfassbare systematische Anteile und zufällige Anteile gruppieren [VIM 2012], [GEIGER U. KOTTE 2008]. Der Ansatz besteht neben einer Vermeidung von Abweichungsursachen in der Erfassung und Kompensation erfassbarer systematischer Abweichungsanteile. Dazu zählen seitens der Achsen die Führungsabweichungen. Diese verhalten sich größtenteils systematisch, z.B. durch statische Formabweichung der Führungsbahnen, teils jedoch auch zufällig, z.B. durch Formabweichungen der Wälzkörper. Zufällige Abweichungen können nicht durch Erfassung und Korrektion reduziert werden. Im weiteren Sinne systematisch können auch Hysterese-Effekte betrachtet werden, deren Modellierung jedoch nicht trivial ist. Eine Quelle vermeidbarer systematischer Einflüsse liegt in der Montage und Ausrichtung der Drehachsen zueinander, der Fertigungsgenauigkeit der mechanischen Adapter und der Positionsabweichung des Sensorarbeitspunktes. In Summe führt dies dazu, dass sich die Rotationszentren der beiden Achsen durch Verkippung und Verschiebung nicht ideal schneiden und dass der Sensorarbeitspunkt neben dem idealen Schnittpunkt liegt. Die Überlagerung all dieser genannten systematischen Abweichungen führt zu einer reproduzierbaren Bewegungstrajektorie des Sensorarbeitspunkts im Raum. Sie soll in einem Kalibrierfeld erfasst werden und es soll über die Achsbewegungen der NMM-1 eine Korrektion stattfinden. Es verbleiben nach Korrektion nur zufällige Messabweichungen sowie unbekannte systematische Messabweichungen.

Zur Füllung des Kalibrierfeldes mit Informationen sind Kalibrierdaten der Hersteller eine mögliche Quelle. Diese Daten werden z.B. mit Autokollimatoren oder kapazitiven Sensoren erfasst, [VDI/VDE 2617 Blatt 4 2006], [WECK U. BRECHER 2006]. Für die Aerotech-Achse sind diese für den Winkelbereich 180° vorhanden und wurden beim Hersteller mittels eines Autokollimators erfasst. Aus Gründen der passiven Gerätesicherheit wurde der Drehbereich mechanisch auf 180° gesperrt. Eine Separation in einen systematischen Anteil und einen zufälligen durch den Hersteller ergibt für den Taumel eine Spannweite von 8,21 arcsec systematisch und 0,95 arcsec zufällig. Zusätzlich würden die Kalibrierdaten der Smaract-Achse benötigt, sowie Informationen über die Ausrichtung der Achsen samt Sensor zueinander in der fertig montierten Baugruppe. Anstatt die Abweichungen der Einzelkomponenten selbst einzeln zu erfassen und zu überlagern, kann ein direkterer Ansatz genutzt werden. Während der Messung mit dem Rotationsprinzip ist die relevante Anforderung, dass der Sensor in Bezug zum Werkstück bzw. zum Werkstückkoordinatensystem mit der geforderten Präzision wiederholt positioniert wird. Deshalb soll mit dem im Folgenden beschriebenen Kalibrierkonzept die Position des geneigten Sensors im Werkstückkoordinatensystem bestimmt werden. Diese Methode soll über ein vom quasitaktilen Sensor erfasstes Kalibrierartefakt erfolgen, dessen Position im Werkstückkoordinatensystem bekannt ist. Mit resultierender Kenntnis der tatsächlichen Sensorposition über den Rotationsbereich kann der Unterschied durch die Achsbewegung der NMM-1 kompensiert werden.

7.1 In-situ Kalibrierkonzept

Als Grundlage zur Bestimmung der Position und Abweichungen des Sensors wird ein Kalibrierartefakt benötigt, das vom Sensor erfasst werden kann. Nach [JUSKO U. NEUGEBAUER 2007] sind für den Mikro- und Nanobereich verschiedene Artefakte denkbar, unter anderem

Kugeln. Präzisionskugeln kommen ebenfalls bei der Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten zum Einsatz und können mit einer Formabweichung weniger Nanometer hergestellt werden, sofern eine Mindestgröße im Millimeterbereich vorliegt. Kleinere Kugeln mit Durchmessern unter 1 mm sind, wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt, schwieriger zu fertigen [JUSKO U. NEUGEBAUER 2007]. Insbesondere die Kalibrierung der Position von Tastsystemen sowie von Rotationsachsen in KMGs erfolgt unter Verwendung von Präzisionskugeln. Dies wird in der Normenreihe ISO 10360 „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG)“ näher beschrieben. Speziell die Prüfung von Tastsystemen ist in [DIN EN ISO 10360-5 2011] „Prüfung der Antastabweichungen von KMG mit berührendem Messkopfsystem“ beschrieben, unter anderem für Dreh-Schwenk-Systeme aus dem Makrobereich. Zudem werden Drehachsen und deren Kalibrierung mit Kugelartefakten in [DIN EN ISO 10360-3 2000] „KMG mit der Achse eines Drehtisches als vierte Achse“ behandelt. Da mit dem elektrischen Sensor bei Hoffmann bereits einschlägige Erfahrungen bei der Verwendung von Kugeln gesammelt wurden, steht auch seitens des Sensors einer Verwendung von Kugelartefakten nichts entgegen. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil des elektrischen Sensors gegenüber Profilometern, da durch den Wegfall der Flankenkollision bei Tastkugeln der erfassbare Winkelbereich signifikant größer ist. Bei der Erfassung von Kalibrierkugeln kann die komplette obere Hemisphäre gemessen werden, anstatt nur eines Kugelsegments, wie bei einem Profilometer.

7.1.1 Bestimmung des Antastpunktes mittels Kalibrierartefakt

Als Aufbau wird ein Schema nach Bild 57 gewählt. Ein Kugelartefakt wird zusammen mit dem Werkstück auf den Werkstückträger fest aufgebracht, so dass eine Halbkugel erfassbar ist. Durch Messung der Kugeloberfläche mit dem Sensor kann über das geometrische Ausgleichselement Kugel die Mitte des Artefakts im Gerätekoordinatensystem ermittelt werden, was zugleich den Nullpunkt des Werkstückkoordinatensystems bildet. Mit Kenntnis des Kugeldurchmessers lassen sich der Antastpunkt des Sensors in Bezug zum Ursprung und damit ein Oberflächenpunkt des Werkstücks im Werkstückkoordinatensystem berechnen.

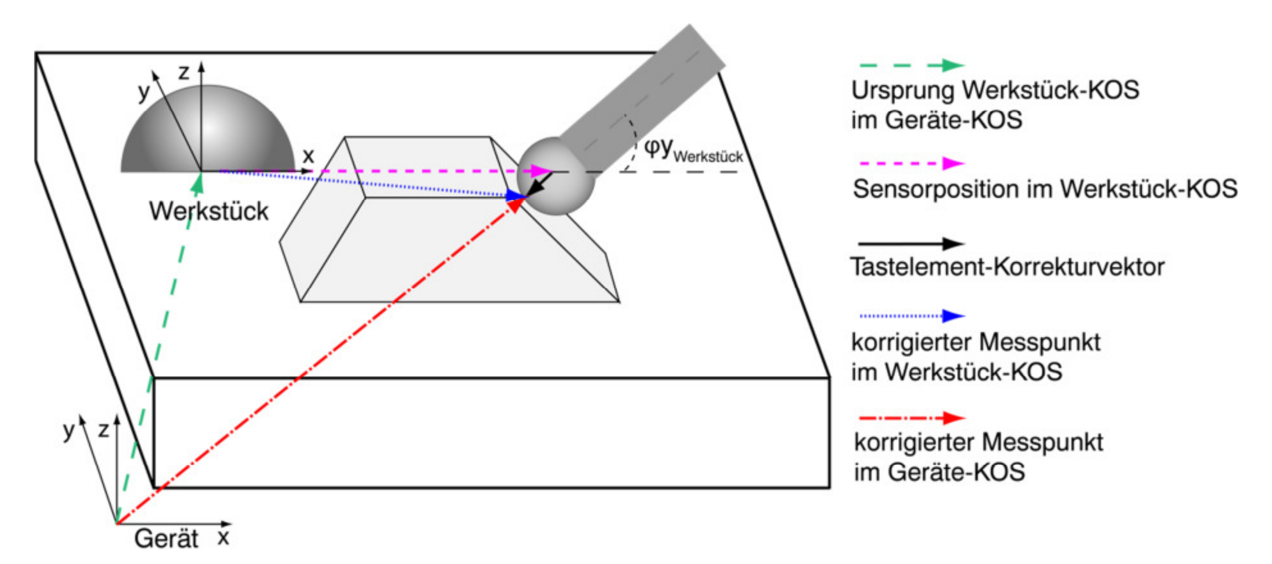


Bild 57: Beziehung zwischen Kalibrierartefakt, Geräte- und Werkstückkoordinatensystem

Bei der Kalibrierung überlagern sich der Radius der Kalibrierkugel und der Radius der Sensorverrundung. Der eigentliche Tastpunkt mit dem Werkstück wird vom Verrundungsmittel-

punkt aus, dem angezeigten Messpunkt, über den Tastelementradius und die Antastrichtung bestimmt, dem Tastelement-Korrekturvektor, [DIN EN ISO 10360-1 2003]. Der Rotationspunkt des Sensors wird nun bewusst in den Mittelpunkt seiner Spitzenverrundung gelegt, bzw. bei Tastkugeln in deren Zentrum, Bild 58 links. Die alternative Variante, den Sensor direkt um den Arbeitspunkt zu drehen, wird in Bild 58 rechts dargestellt. Wenn keine Kompensationsbewegung durch die NMM-1 notwendig wäre, wäre letztere Variante zu bevorzugen. Dadurch, dass eine Kompensation erfolgen muss, vereinfacht eine Rotation um das Krümmungszentrum jedoch den Kalibriervorgang, da der Mittelpunkt weniger lateral wandert.

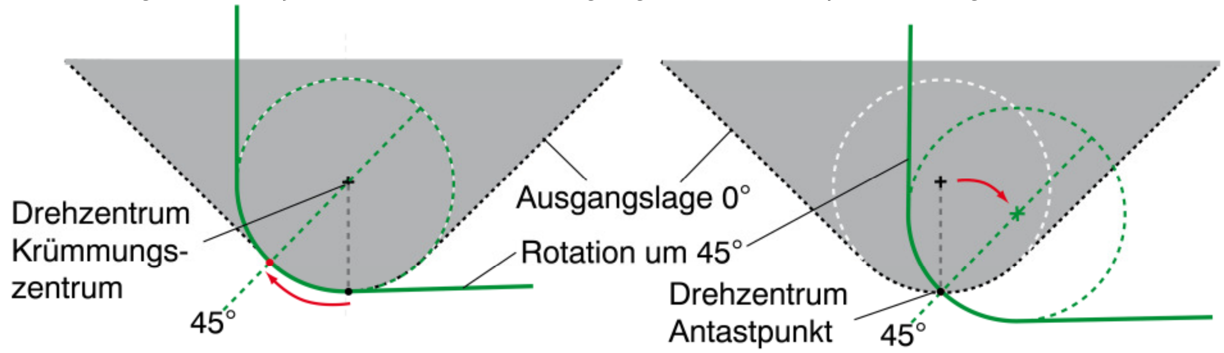


Bild 58: Links: Rotation um Krümmungszentrum. Rechts: Rotation um Arbeitspunkt

7.1.2 Erfassung der Positionsabweichung im Werkstückkoordinatensystem

Die Kalibrierung der Sensorposition im Werkstückkoordinatensystem über den genutzten Winkelbereich der Drehachsen erfolgt nach [DIN EN ISO 10360-5 2011] Punkt 8.2 "Prüfung der Antastabweichungen von KMG mit berührendem Messkopfsystem“. Diese berücksichtigt im Speziellen Dreh-Schwenk-Messkopfsysteme, wie in Kapitel 2.3 schon erwähnt, deren Kalibrierverfahren auf die Rotationskinematik mit dem quasi-taktilen Sensor übertragen werden können. Sie gibt vor, die Position einer Prüfkugel mit dem Messkopfsystem zu erfassen und unterscheidet zwischen den Methoden empirisches Einmessen und abgeleitetes Einmessen. Beim empirischen Einmessen erfolgt die Messung der Referenzkugel in jeder der zu benutzenden Winkelstellungen, beim abgeleiteten Einmessen werden die Parameter durch z.B. Interpolation aus wenigen empirischen Parametern bestimmt.

Unter Anwendung dieses Aufbaus kann nun die Tastelementposition über mehrere Winkelpositionen erfasst werden und die Bestimmung des tatsächlichen Arbeitspunktes für jeden Winkel erfolgen. Es werden mit diesem Ansatz Korrekturvektoren im Werkstückkoordinatensystem berechnet, um die systematischen Positionsabweichungen zu kompensieren. Sie werden in einem Korrekturfeld zusammengefasst, während der Messung von der Ablaufsteuerung aufgerufen und bei der Sensorpositionierung addiert. Das Verfahren kann durch Verbindung des Kalibrierartefakts mit dem Werkstück und Verwendung der vorhandenen Sensorik in-situ im Prototyp durchgeführt werden.

7.1.3 Einmessen mit dem elektrischen Sensor

Die Erfassung des Kalibrierartefakts mit dem elektrischen Sensor erfolgt nahezu identisch wie eine taktile Erfassung. Bei diesem kontaktlosen Prinzip wird aber zusätzlich der Arbeitsabstand berücksichtigt. Dieser Abstand variiert abhängig von der Materialpaarung und den Sensoreinstellungen von wenigen Nanometer bis zu 200 nm. Zwischen der Sonde und dem

Werkstück bildet sich die Wirkzone aus, in der der Stromfluss stattfindet, dessen Betrag vom Abstand abhängt. Die Wirkzone kann sich in jeder Raumrichtung um die Sonde ausbilden, je nach Antastrichtung. Bild 59 zeigt in einem Schema kombiniert an mehreren Positionen und Abständen die Erfassung einer Kugel. Der Stromfluss bildet sich immer in Normalenrichtung aus. Wenn zur Koordinatenaufzeichnung ein konstantes Sensorsignal genutzt wird, ergibt sich der erfasste Kugelradius L_1 bis L_3 aus dem Sondenradius r, dem Artefaktradius R und dem Arbeitsabstand l_1 bis l_3. Durch Kalibrierung mittels des Kugelartefakts lässt sich damit der Antastpunkt bei gleichbleibendem Sensorsignal und der Antastrichtung berechnen. Unter Verwendung der polynomiell approximierten Sensorkennlinie kann der Antastpunkt auch bei variierendem Signal berechnet werden. Eine direkte Berechnung des Arbeitsabstandes l ist hingegen nur begrenzt möglich, da die Formabweichung der Sonde üblicherweise größer ist als der Arbeitsabstand. Stattdessen wird ein effektiver Radius r_{eff} = L-R genutzt.

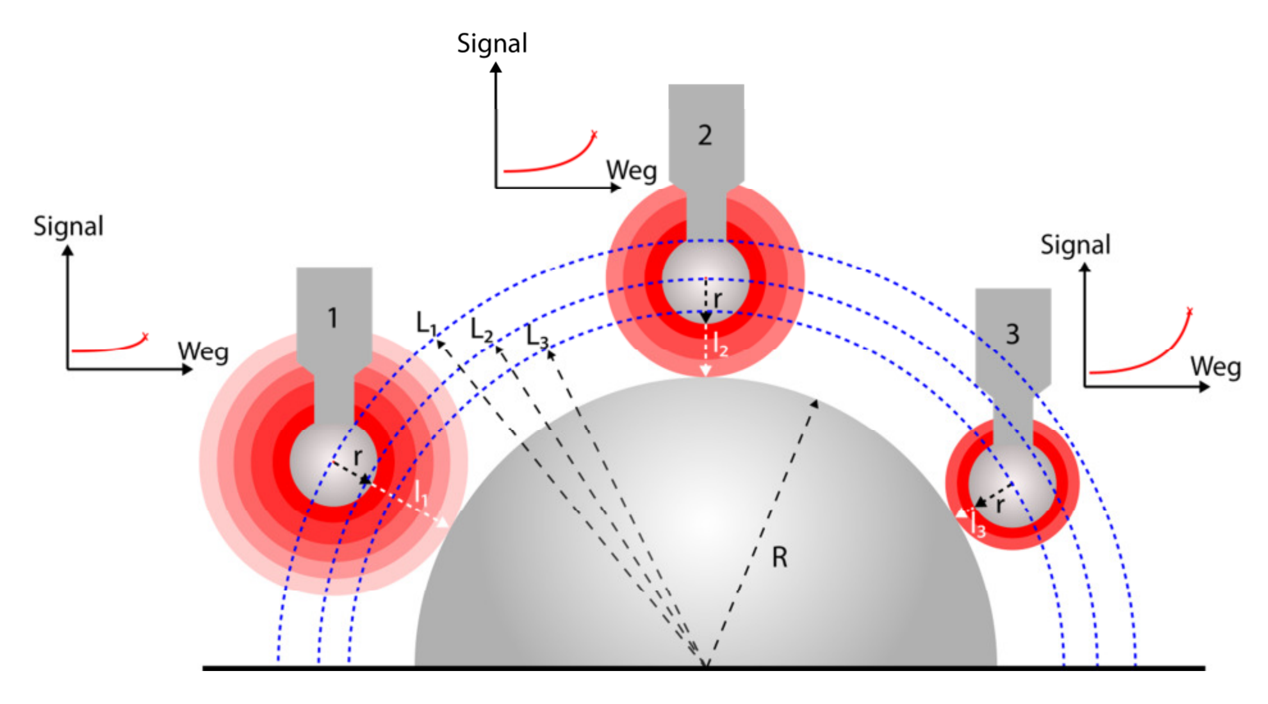


Bild 59: Arbeitsabstand und effektiver Radius bei unterschiedlicher Signalstärke

7.1.4 Messablauf unter Verwendung des Korrekturfeldes

Unter Einbezug des Korrekturfeldes kann der bereits in der Simulation gezeigte Ablauf wie folgt in die Ablaufsteuerung integriert werden. Beginnend mit 0° Rotation erfolgt die Oberflächenmessung in Einzelpunktantastung. Erst wenn ausreichend Punkte aufgezeichnet wurden, greifen die Algorithmen der gewählten Strategie. Die erfassten Oberflächenpunkte werden über den Mittelpunkt des Tastelements und den aktuellen Korrekturvektor in das Werkstückkoordinatensystem gebracht. Ein weiterer Vektor vom Sensormittelpunkt in Rotationsrichtung und der Länge des effektiven Radius wird dazu genutzt. Die transformierten Koordinaten werden in den Algorithmus der Strategie geladen, welcher den neuen Winkel berechnet. Sofern die Winkeländerung eine Drehung rechtfertigt, wird zuerst der Sensor von der Oberfläche getrennt und dann die Rotation durchgeführt sowie die neue Mittelpunktskoordinate des Sensors geladen. Dieser Vorgang ist in Bild 60 a) bis c) dargestellt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine weitere Kurzzeitkalibrierung durchzuführen, um eine zeitlich aktuelle Sensorposition zu erhalten. Dies erfasst z.B. zeitveränderliche Abweichungen wie Drift. Der Sensor wird danach, Bild 60 d), mit seinem Arbeitspunkt über den nächsten zu erfassenden Oberflächenpunkt gebracht, e). Sequentiell ergibt sich nach diesem Schema eine

Linienmessung. Anstatt einer Einzelpunktantastung kann bei kurzen Strecken genauso ein Scanning genutzt werden. Ein Abheben des Sensors zur Rotation ist aber dennoch nötig, da weder die Controller der Drehtische noch die DSP der NMM-1 eine synchronisierte gemeinsame Trajektorie erlauben.

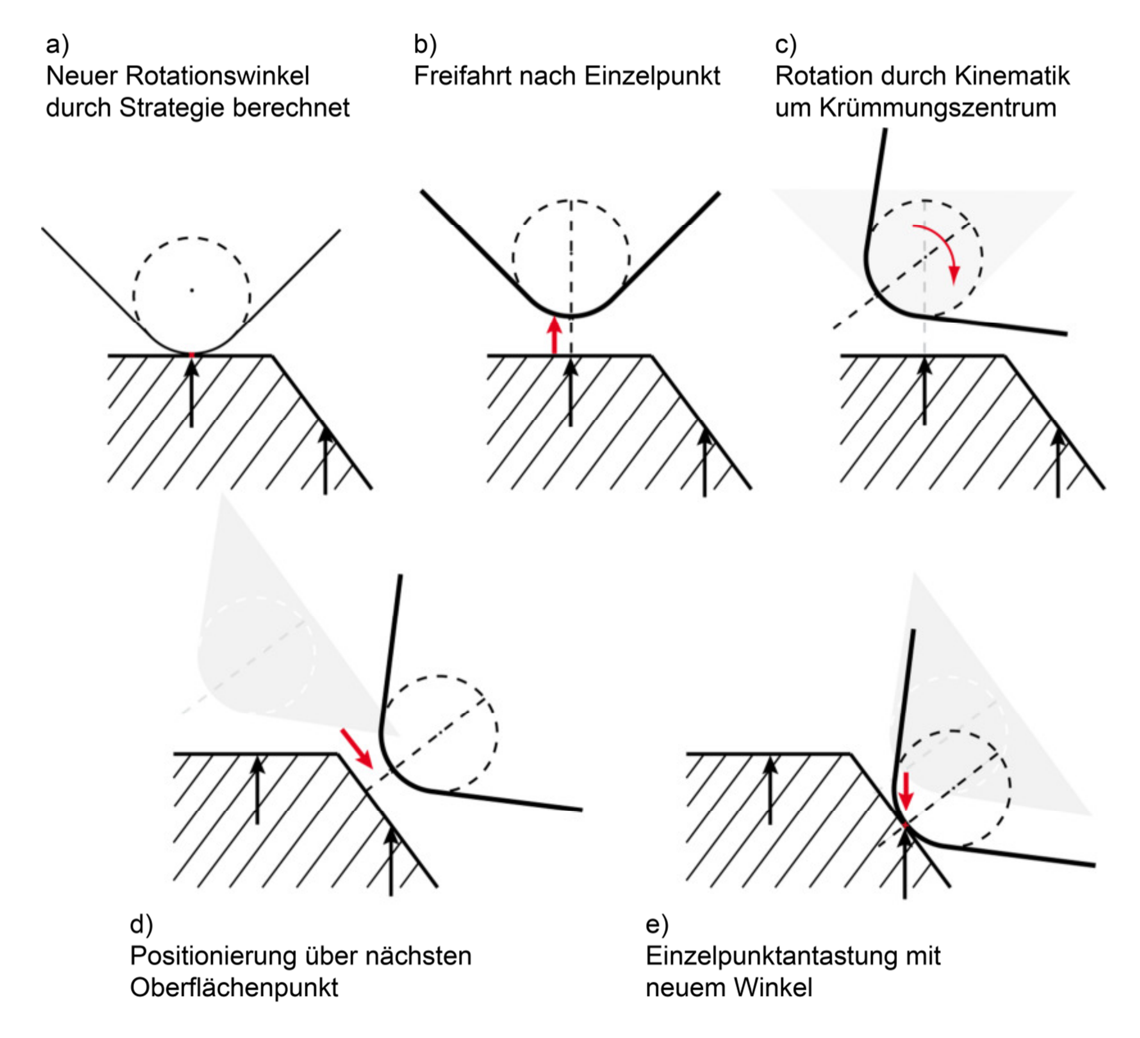


Bild 60: Bewegungsschritte mit Sensorrotation

7.1.5 Kalibrierartefakt

Eine praktische Implementierung des Kalibrierartefakts zeigt Bild 61. In eine Trägerplatte wurde eine Präzisionskugel der Güteklasse G5 (Abweichung von der Kugelform < 0,13 µm nach [DIN 5401 2002] „Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf“) eingelassen und mittels Silberleitlack eine zuverlässige elektrische Verbindung hergestellt. Die Trägerplatte kann über das Lochmuster spielfrei auf der Spiegelecke der NMM-1 fixiert werden. Vor dem Kugelartefakt ist zudem ein Werkstück zu sehen, eine halbe Wendeschneidplatte, die in 8.3.1 näher beschrieben wird. Die Kugel hat einen Nenndurchmesser von 4 mm und wurde am Messzentrum des Lehrstuhls QFM kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte mit einem Werth Videocheck 400 UA unter Verwendung eines mikrotaktilen Tastsystems Werth Fiber Probe 3D. Dieses System hat laut Datenblatt eine Antastabweichung bei Einzelpunkterfassung von 0,25 µm [WERTH 2012], bzw. liegt sie ohne Berücksichtigung der Tastkugelformabweichung im Bereich von 300 nm, [PETZ U.A. 2012].

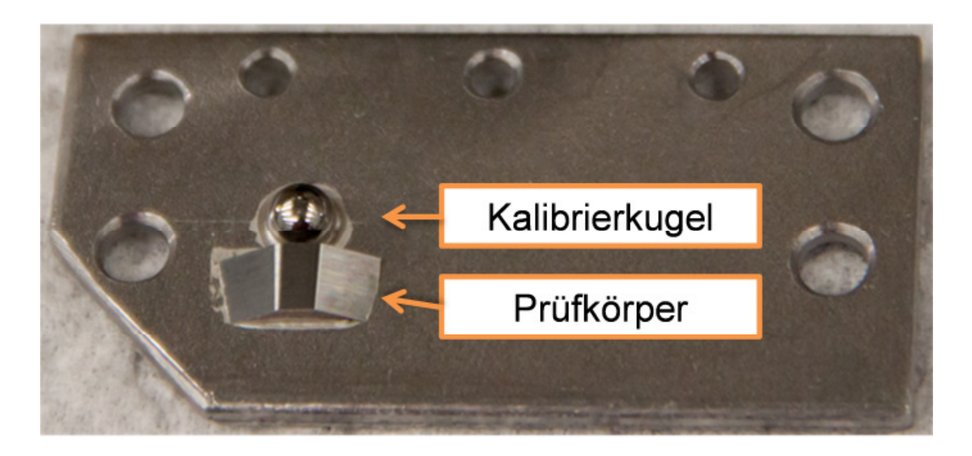


Bild 61: Werkstückträger mit elektrisch leitend aufgebrachter Kalibrierkugel und Prüfkörper

Die verwendete Tastkugel aus Glas hatte im vorliegenden Fall einen Durchmesser von 248 µm. Es wurden auf der oberen Kugelhemisphäre 25 Punkte aufgenommen, verteilt nach der Empfehlung in [DIN EN ISO 10360-5 2011]. Der Durchmesser ergibt sich damit zu 3,9994 mm mit einer Formabweichung von 2,96 µm, abweichend zur angegebenen Formabweichung. Mögliche Ursachen ergeben sich durch Verunreinigung von Artefakt oder Antastkugel, einer tatsächlichen Formabweichung, oder einer Antastabweichung des Mikrotastsystems. Zur näheren Untersuchung wurde die Einzelpunktabweichung betrachtet und ein Ausreißer in X-Richtung festgestellt, Bild 62. Dieser trat auch bei allen direkt vorausgegangenen Messungen der Kugel auf und kann u.U. auf Verschmutzung zurückgeführt werden, eine Sichtprüfung ergab jedoch keine offensichtlichen Ursachen. Bei Eliminierung des Ausreißers resultiert eine Formabweichung von 1,14 µm. Dieser Wert wurde unter Verwendung der „matlab least squares geometric element software" des NPL [LSGE 2012] ermittelt, auf Basis der Tastermittelpunktsdaten vom Videocheck UA. Auf Basis der Verteilung der Residuen kann keine eindeutige Ursache der Formabweichung identifiziert werden.

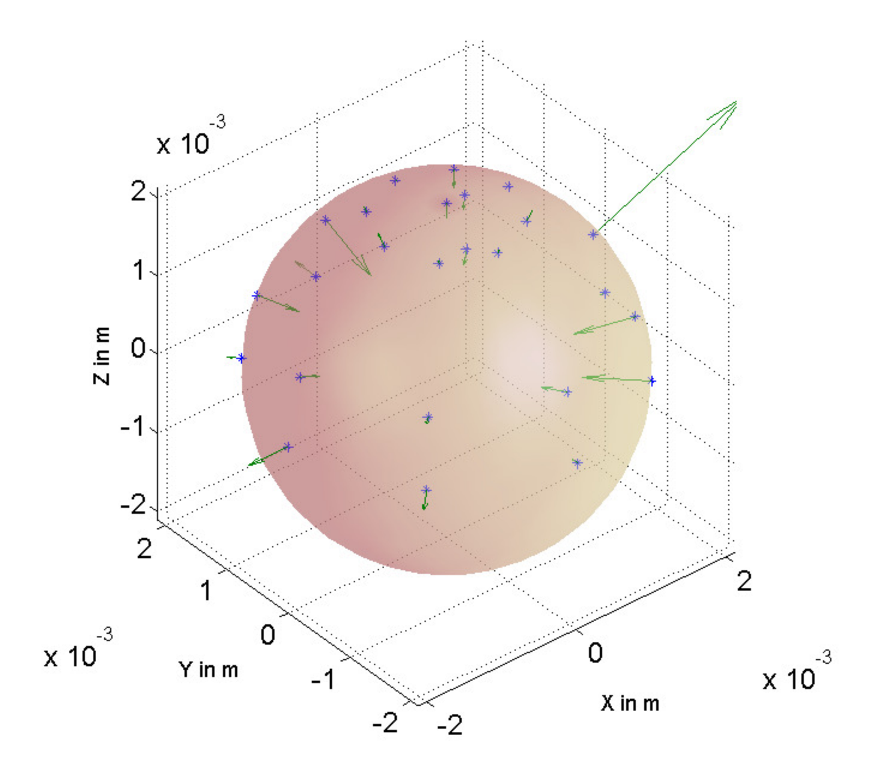


Bild 62: Residuen der Antastpunkte auf dem Kugelartefakt (ohne Tastkugelradiuskorrektur). Abweichungen 1000-fach überhöht dargestellt

8 Ergebnisse Teil 2: Messungen mit dem Prototyp

Mit erfolgreicher Inbetriebnahme der Einzelkomponenten des Prototypen und der gemeinsamen Ablaufsteuerung, wurde die Funktion als Ganzes validiert. Mittels unterschiedlicher kalibrierter Prüfkörper erfolgten Vergleichsmessungen zwischen einer klassischen Messung ohne Sensorrotation und einer Messung mit dem Rotationsprinzip. Deren Vergleich ergibt Aufschluss über den effektiven Nutzen des Verfahrens und dessen optimalen Einsatz.

Sensorkonfiguration

Für die Messungen wurde, sofern nicht anders angegeben, die folgende Sensorkonfiguration genutzt: Als Sensorspitze kam ein Mikrotaststift mit einer Kugel des Durchmessers 300 µm aus Hartmetall vom Hersteller Carl Zeiss zum Einsatz. Eine Kalibrierung mittels Videocheck UA 400 und dem Werth Fiber Probe 3D liefert einen Durchmesser von 302,92 µm bei 307 nm Formabweichung. Der elektrische Sensor wurde bei einer Spitzenspannung von 600 mV und einem Verstärkereingangsbereich von 0 – 10 nA genutzt. Als Arbeitspunkt für die Einzelpunktantastung wurde 250 mV, äquivalent 0,25 nA eingestellt.

8.1 Aufzeichnung des Kalibrierfeldes

Zur Korrektion systematischer Positionsabweichungen wurde das Kalibrierfeld erfasst und zudem die anvisierte Positioniergenauigkeit der Rotationskinematik validiert. Das genutzte Kalibrierfeld wurde über einen Winkelbereich von -31° bis +31° ermittelt, optimiert für den Demonstrator, Kapitel 8.3.1. Als Winkelabstand der Stützpunkte und gleichzeitig der später wählbaren Winkel wurde 1° gewählt. Dies entspricht dem empirischen Einmessen von Dreh-Schwenk-Systemen nach [DIN EN ISO 10360-5 2011]. Benötigte Zwischenwinkel während der Anwendung könnten aus den Stützpunkten interpoliert werden, was einem abgeleiteten Einmessen entsprechen würde. Für jeden Winkelschritt wurde mit der Sensorkugel das Kugelartefakt erfasst. Es wurden neun gleichmäßig verteilte Oberflächenpunkte erfasst, einer am Pol, vier beim Elevationswinkel 60° und den Azimuthwinkeln 0°, 90°, 180°, 270° und vier beim Elevationswinkel 75° und den Azimuthwinkeln 45°, 135°, 225° und 315°. Nach [DIN EN ISO 10360-5 2011] sollten für das Einmessen von Dreh-Schwenk-Messkopfsystemen hinsichtlich Form, Maß und Ort der Prüfkugel 25 Einzelpunkte aufgenommen werden. Aufgrund der geringen Antastabweichung des elektrischen Tastsystems im Vergleich zur Formabweichung der Kalibrierkugel ist eine Bestimmung der Antastabweichung nicht sinnvoll, siehe [HOFFMANN 2009]. Da nur der Ort bestimmt wird, erfolgt in Anlehnung an [VDI/VDE 2617 BLATT 5 2010] eine Reduktion der Anzahl der aufgenommenen Punkte. Die Richtlinie empfiehlt bei der Bestimmung einer Längenmessabweichung am Antastelement Kugel fünf Messpunkte. Da der Äquator bei der Antastung von oben, analog der Simulationslogik, nicht erreichbar ist, wurde die zusätzliche Ebene bei der Elevation 75° eingefügt. Jeder Punkt wurde mit Einzelpunktantastung erfasst und jeweils fünf Werte aufgezeichnet. In die resultierenden 45 Punkte wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Kugel als geometrisches Ausgleichselement eingepasst. Bild 63 zeigt die erfassten Mittelpunkte des Artefakts aus zwei Bewegungsrichtungen. Die kreisförmige Trajektorie mit einer lateralen Ausdehnung von 500 µm deutet auf eine Abweichung bei der Ausrichtung des Sensors in den Rotationspunkt bzw. eine Abweichung der Ausrichtung der Drehachsen hin. Die der Kreisform überlagerte Abweichung zeigt hingegen die Führungsabweichungen der Achsen. Das Ziel ist, beide systematischen Abweichungen durch Anwendung des Kalibrierfeldes zu eliminieren.

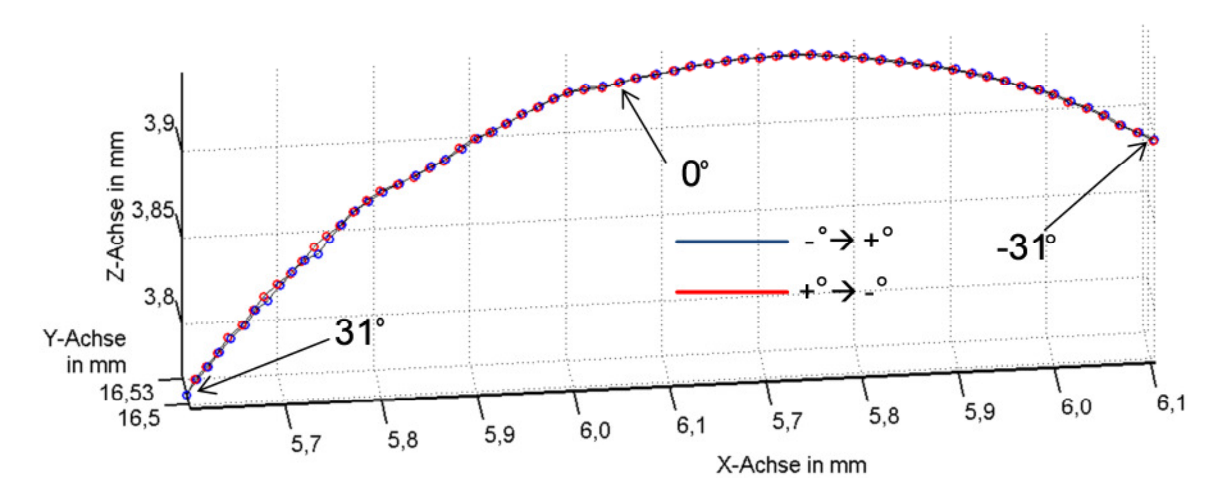


Bild 63: Mittelpunktkoordinaten der Kalibrierkugel über den Winkelbereich

8.2 Genauigkeit und Präzision der Winkeladressierung

Als Vergleichsbasis für folgende Untersuchungen wurde die Wiederholpräzision des Sensors im Aufbau betrachtet, von Restbewegungen der Positionsregelung der Rotationskinematik abgesehen. Dazu wurde nach thermischer Stabilisierung über die Dauer einer Nacht der Mittelpunkt der Kalibrierkugel bei der Winkelstellung 0° zehnfach wiederholt erfasst. Analog Kapitel 5.2.2 wurde die Wiederholstandardabweichung berechnet durch Bestimmung des Mittelpunkts der Ermittlungsergebnisse und Berechnung der Abstandsvektoren in ihren kartesischen Einzelkomponenten. Es resultiert für die Wiederholstandardabweichung σ_r 1,3 nm in X, 1,8 nm in Y und 5,0 nm in Z. Zusätzlich kann noch die Spannweite der Einzelergebnisse angegeben werden mit 3,7 nm in X, 5,1 nm in Y und 17,1 nm in Z. Auffällig ist die geringere Wiederholpräzision in Z, die in erster Näherung dem Antastvorgang in Z-Richtung oder der später näher betrachteten Formabweichung der Kalibrierkugel am Pol zuzuschreiben ist.

Die Untersuchung wurde über einen größeren Winkelbereich von -30° bis +30° in 10° Schritten wiederholt, ohne thermische und mechanische Stabilisierungsphasen wie im Vorversuch. An insgesamt 19 Winkelpositionen wurde der Kugelmittelpunkt je fünfmal in direkter Folge erfasst. Es ergibt sich auf Basis der 95 Vektoren über den Arbeitsbereich eine Wiederholstandardabweichung σ_r und eine Wiederholgrenze r nach Tabelle 7. Eine Betrachtung der einzelnen Positionen und ein Vergleich mit anderen Daten zeigt eine erhöhte Abweichung bei 10°, möglicherweise durch lokale Formabweichung oder Verunreinigung bedingt. Nach Eliminierung ergibt sich in X-und Z-Richtung eine deutlich bessere Wiederholpräzision, Tabelle 7. Auch hier zeigt sich eine erhöhte Schwankung in der Z-Achse.

Wiederholpräzision Kugelerfassung bei stehenden Achsen	**X**	**Y**	**Z**
Wiederholstandardabweichung σ_r	12,3 nm	4,9 nm	39,9 nm
Wiederholgrenze r	34,4 nm	13,8 nm	111,6 nm

Wiederholpräzision Kugelerfassung bei stehenden Achsen ohne Winkelposition 10°	**X**	**Y**	**Z**
Wiederholstandardabweichung σ_r	6,7 nm	5,2 nm	18,5 nm
Wiederholgrenze r	18,8 nm	14,7 nm	51,7 nm

Tabelle 7: Wiederholpräzision des Sensors bei stehender Rotationskinematik

Die Ergebnisse für den komplett stationären Betrieb sind im Einklang mit den Erfahrungswerten von Hoffmann und übertreffen die Angaben der Wiederholbarkeit der Antastung, angegeben mit einer Antastunsicherheit von ± 60 nm in 3D (k=2). Die Resultate über den kompletten Arbeitsbereich ohne Stabilisierungsphase können auf die Positionsregelung und thermische Effekte zurückgeführt werden. Sie sind jedoch der spätere Praxisfall und gelten als Referenzwerte für die Wiederholbarkeit des Sensors ohne explizite Bewegung.

Unter Nutzung des Kalibrierfeldes folgte die Untersuchung der undirektionalen und der bidirektionalen Genauigkeit. Es wurden über den Bereich von ± 30° in 10° Schritten sechs Positionen zweimal unidirektional angesteuert und fünf Positionen mindestens zweimal bidirektional. Jede Position wurde nach Ansteuerung fünfmal konsekutiv erfasst und gemittelt, um den Einfluss des Sensors zu senken und den der Achsen hervorzuheben. Es zeigte sich, dass insbesondere bei bidirektionaler Antastung die Wiederholgrenze der einzelnen Fünfer-Gruppen deutlich geringer war als die Wiederholgrenze aller Punkte an einer Winkelstellung. Nach Berechnung der Abstandsvektoren zum Mittelpunkt der jeweiligen Winkelposition resultierten 12 Abstände unidirektional und 15 bidirektional. Die Auswertung erfolgte analog [DIN EN ISO 10360-5 2011] mit der Kenngröße P_{LTE} „Mehrfachtaster-Ortsabweichung für Mehrfachtaster mit Dreh-Schwenk-Messkopfsystem und empirischem Einmessen“. Sie beschreibt die Spannweite der Mittelpunktkoordinaten (X, Y und Z) einer Prüfkugel, die bei fünf verschiedenen Winkelstellungen bestimmt wird. Es ergeben sich Resultate nach Tabelle 8. Bei Eliminierung der 20° Position und Reduktion auf die fünf vorgeschlagenen Winkelstellungen können die Resultate weiter gesenkt werden. Die bidirektionale Antastung liefert abweichende Ergebnisse, um den Faktor 4 bis 16 schlechter, insbesondere in der X-Achse. Dies deutet auf eine ausgeprägte Hysterese hin, was sich auch in Bild 63 schon vermuten lässt.

	X	Y	Z
Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} über den Bereich ± 30°, unidirektional	170,3 nm	191,1 nm	86,3 nm
Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} über den Bereich ± 30° ohne 20°, unidirektional	88,7 nm	99,4 nm	86,3 nm
Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} über den Bereich ± 30°, bidirektional	1436,6 nm	419,8 nm	322,6 nm

Tabelle 8: Mehrfachtaster-Ortsabweichung über den Bereich ± 30°

Daraufhin wurde der Test an der Stelle 0° mit mehreren Durchläufen wiederholt. Es wurde fünfmal von -2° und fünfmal aus +2° die Position 0° angesteuert, resultierend in zehn unidirektionalen Abständen und zehn bidirektionalen. Die Resultate sind in Tabelle 8 zusammengefasst, bei einer Betrachtung im Histogramm sind keine Ausreißer identifizierbar.

	X	Y	Z
Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} bei 0°, unidirektional	137,6 nm	32,7 nm	57,7 nm
Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} bei 0°, bidirektional	1059,9 nm	50,1 nm	151,5 nm

Tabelle 9: Mehrfachtaster-Ortsabweichung bei 0°

Im Detail liefern sowohl unidirektionale als auch bidirektionale Ansteuerung bei diesem reduzierten Winkelbereich bessere Ergebnisse. Jedoch bestätigt die Auswertung die Hysterese auch für kleinere Drehwinkel. Die Ursache der Hysterese wurde hinsichtlich der Herkunft untersucht. Für die Winkel 10° und 20° wurde die bidirektionale Ortsabweichung bei jeweils einer stillstehenden Drehachse betrachtet. Es ergab sich für eine Wiederholung und fixierter Smaract-Achse ein Abstand von 533 nm in 3D bei 10° und 23 nm bei 20°. Bei statischer Aerotech-Achse ergaben sich hingegen 1390 nm respektive 1150 nm. Die Quelle der Hysterese scheint primär bei der Smaract-Achse zu liegen, welche im Vergleich zur Aerotech-Achse die

Führungen mit der geringeren Genauigkeit verwendet. Die Abweichung primär in der X-Achse deutet beim Aufbau auf einen Taumel der Smaract-Achse quer zur Gewichtskraft bei Richtungsänderung hin. Um den Effekt der Hysterese zu umgehen wurde das Kalibrierfeld in zwei Versionen abgespeichert mit jeweils einem Korrekturvektor pro Rotationsrichtung.

Auf Basis dieser Messungen zur Wiederholbarkeit kann nach Korrektion erfassbarer systematischer Abweichungen durch das Korrekturfeld eine Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} des Dreh-Schwenk-Systems angegeben werden. Für die X-Komponente wird auf den Wert der zehnmaligen Antastung bei 0° zurückgegriffen, eine Betrachtung des Histogramms kann hier keinen Ausreißer bestätigen. Es resultiert ein P_{LTE} von 137,6 nm in X, 99,4 nm in Y und 86,3 nm in Z. Für eine 3D-Ortsabweichung kann zudem durch direkte Betrachtung der Einzelpunkte der Wert 144,7 nm angegeben werden. Dieser Wert kann winkelabhängig und bewegungslängenabhängig besser sein. Im Vergleich mit den Anforderungen aus der Planungsphase der Achsen, einen Punkt innerhalb eines Fensters von ± 500 nm zu adressieren, übertrifft die realisierte Kinematik in Verbindung mit dem Korrekturfeld diese bei nur ± 68,8 nm in X.

8.3 Messungen mittels Sensorrotation

8.3.1 Prüfkörper

Zur Validierung des Rotationsprinzips in der Praxis wurden geeignete Prüfkörper gesucht. Im Einklang mit der Simulation der Testoberfläche „Kugel“ kann die bereits vorhandene kalibrierte Referenzkugel genutzt werden. Als weiterer Demonstrator wurden in Anlehnung an die Testoberfläche „Rampe“ mehrere gewinkelte Ebenen eingesetzt. Dies ist als eine Wendeschneidplatte realisiert, deren Sitzflächen im Werkzeughalter erfasst werden sollen. Eine Seite der Wendeschneidplatte wurde, um mechanisch integriert werden zu können, durch Drahterosion parallel zur Mittellinie abgetrennt. Die Verbindung zum Werkstückträger erfolgte über Silberleitlack, Bild 61. Die Nebenflächen der Wendeschneidplatte ergeben drei zueinander gewinkelte Ebenen, die zudem leicht zur Trägerplatte geneigt sind. Die Winkel der Ebenen in Bezug zum Werkstückträger wurden mittels des Videocheck UA 400 erfasst unter Nutzung eines Foucault Lasers, dem Werth Laser Probe. Es resultieren der Winkel zwischen Fläche eins und zwei von 27,56° und von Fläche zwei nach drei von 27,38°, Bild 64. Fläche zwei ist zudem zum Grundträger um 6,25° geneigt.

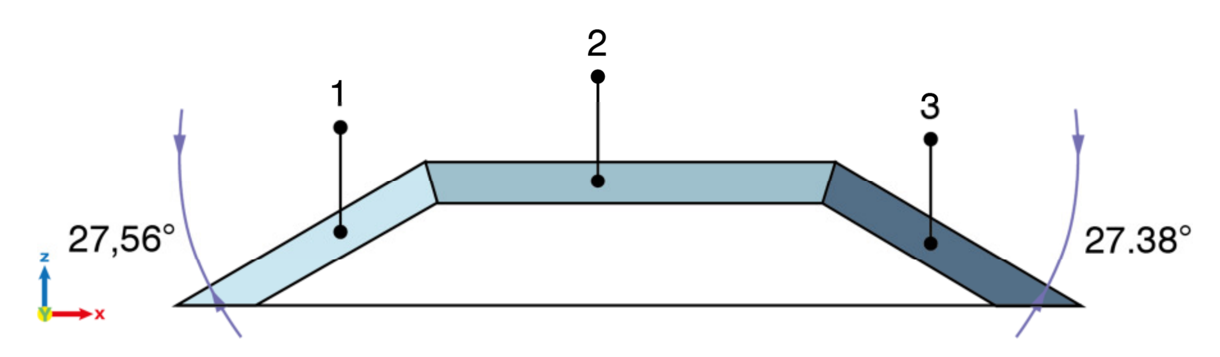


Bild 64: Aufbau des Prüfkörpers Wendeschneidplatte, gewinkelte Ebenen



Bild 65: Messung der Artefakte. Rot markiert: Gewählter Profilschnitt

8.3.2 Konfiguration während der Messung

Auf beiden Prüfkörpern wurde mittels Sensorrotation eine Linienmessung in X-Richtung durchgeführt, der Länge 3,5 mm auf der Kugel und 4,5 mm auf der Wendeschneidplatte, Bild 65. Bei der Kalibrierkugel wurde diese zentriert über den Pol gelegt, bei der Wendeschneidplatte über die drei Ebenen, jeweils in der Mitte. Als Referenzwert wurde jede Messung klassisch ohne Rotation bei 0° durchgeführt. In Verbindung mit dem sphärischen Sensor ist der Vektor von der Sensormitte fix nach unten orientiert. Die Messungen mittels Rotation erfolgten unter Verwendung des Kalibrierfeldes von -30° bis +30° in 1° Inkrementen einmal mit und einmal ohne Kurzzeitkalibrierung nach jeder Rotation. Die Oberflächenpunkte wurden in Einzelpunktantastung aufgenommen mit einer Schrittweite von 10 µm. Alle 100 µm wurden mit einer vorhersagenden Strategie und einem linearen Algorithmus über die letzten Oberflächenpunkte der Rotationswinkel berechnet und eingestellt. Durch die auf Präzision optimierten Bewegungsabläufe nahmen die Messungen längere Zeit in Anspruch. Insbesondere Sequenzen mit Kurzzeitkalibrierung dauerten bis zu einem halben Tag. Um das Klima zu stabilisieren liefen die Messungen bei geschlossener Abschirmhaube der NMM-1 unter Zuhilfenahme eines Videosystems zur Messvorgangsüberwachung. Innerhalb einer Messung war keine thermische Drift erkennbar.

8.3.3 Messung der Kalibrierkugel

Bild 66 zeigt die Ergebnisse auf der Kalibrierkugel mit Sensorrotation und Kurzzeitkalibrierung. Sie zeigt das resultierende Oberflächenprofil mit Rotation, das Profil bei einer klassischen Messung und die Sollkontur auf Basis der Kalibrierwerte der Kugel. Zudem werden die Abweichung gegenüber der Sollkontur, die Abweichungsreduktion gegenüber dem klassischen Scan, sowie die genutzten Drehwinkel dargestellt. Zu Beginn der Messung startet der Scan mit 0° Rotation und die Werte sind mit der klassischen Messung identisch. Nach 100 µm wird erstmalig eine Rotation ausgelöst und dadurch die Abweichung um 75,45 µm reduziert. An dieser Stelle geht die Rotationskinematik in die konfigurierte Stellbegrenzung, was Potenzial für eine weitere Reduktion bietet. Mit fortschreitender Messung Richtung Kugelpol sinkt die Abweichung der statischen Betriebsart und damit schwindet der Angriffspunkt des Rotationsprinzips. Mit erneut steigender Krümmung und Eingriff des Prinzips wird die

Abweichung bis um 94,75 µm reduziert. Bezogen auf die Quadratsumme der Abweichungen zur Sollkontur reduziert die Sensorrotation im Verhältnis zur klassischen Messung die Abweichungen um 95,8 % auf 4,2 %, unter Vernachlässigung des Anfangsbereichs mit 0° Orientierung. Eine Betrachtung der Oberflächenpunkte im Winkelbereich ± 30° liefert wegen der ausbleibenden Stellbegrenzung eine stärkere Abweichungsreduktion um 99,0 % auf 1,0 %. Die Abweichung wäre der Simulation nach in diesem Bereich Null, der Unterschied zur Sollkontur wird in Kapitel 8.3.5 näher behandelt.

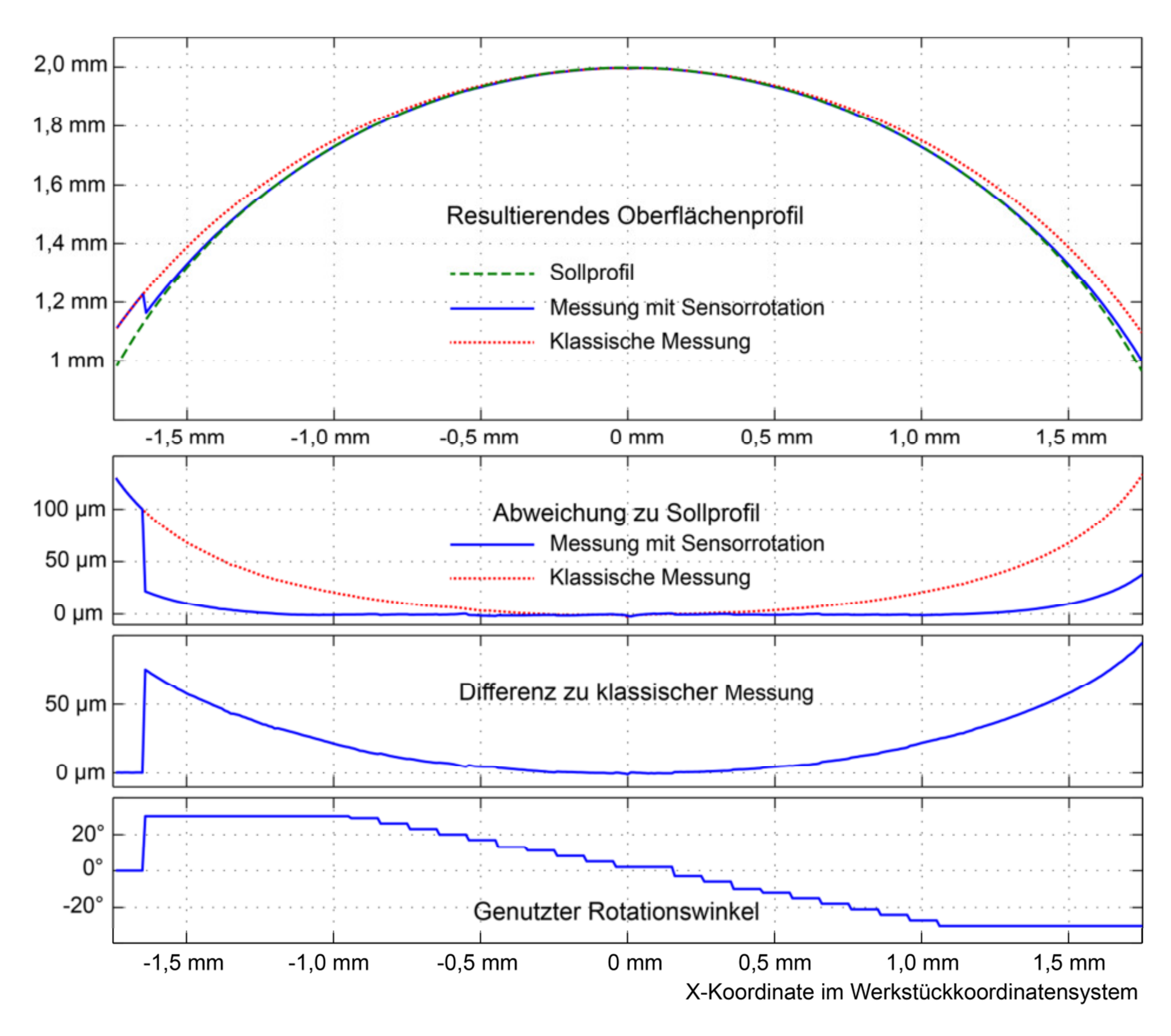


Bild 66: Klassische Messung und Messung mit Sensorrotation auf einer Kugel im Vergleich

8.3.4 Messung der gekippten Ebenen

Die Resultate der Wendeschneidplatte sind in Bild 67 zu sehen. Diese zeigt nach gleichem Schema einen 4,5 mm Scan, zur besseren Übersicht aufgeteilt auf zwei Hälften. Gegenüber der kontinuierlichen Krümmung bei der Kugel führen die Ebenen zu konstanten Drehwinkeln, von den Übergangsbereichen abgesehen. Die Rotationskinematik gerät bei diesem Szenario nicht in die konfigurierte Stellbegrenzung. Gegenüber einem klassischen Scan bringt das Rotationsprinzip bis zu 19,51 µm Verbesserung bei einer mittleren Verbesserung um 8,41 µm. Solldaten zum Vergleich lagen nicht vor. Von besonderem Interesse ist der ge-

krümmte Übergang der Ebenen. In Verbindung mit einer langsamen Winkelaktualisierung im Abstand von 100 µm erfolgt die Nachführung zu langsam und die Abweichung wird zu schwach reduziert. Zuletzt verursacht bei der Position X = -0,5 mm und dem Beginn der Ebene der gewählte Rotationswinkel eine größere Abweichung als keine Rotation. Danach, in der oberen Ebene, läuft der Sensor mit 0° Rotation auf der gleichen Bahn wie der klassische Scan. Es empfiehlt sich zur weiteren Optimierung die Aktualisierungsintervalle, sowohl seitens Software als auch Hardware, strukturgrößenabhängig zu gestalten.

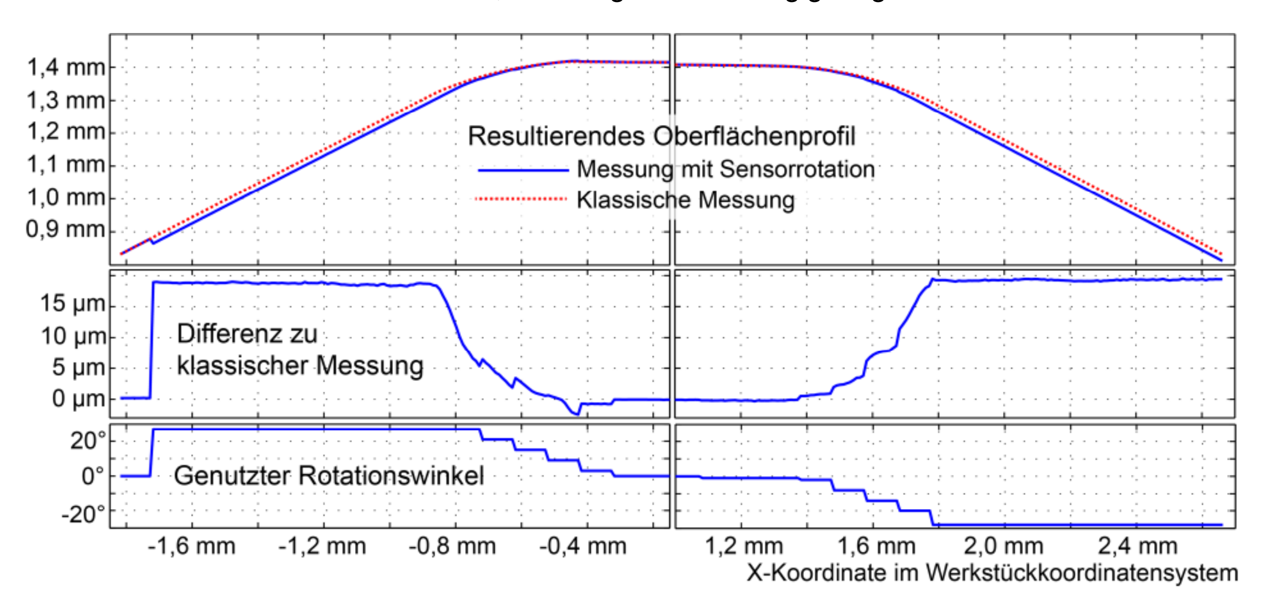


Bild 67: Klassische Messung und Messung mit Sensorrotation auf geneigten Ebenen im Vergleich

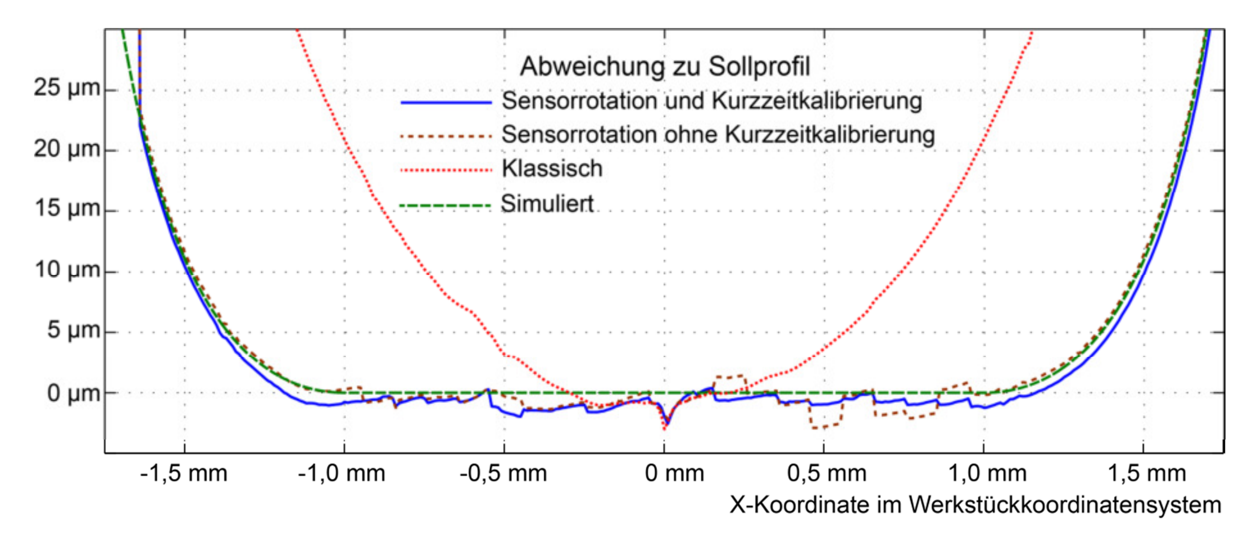


Bild 68: Detailansicht klassische Messung und Sensorrotation auf Kugel

8.3.5 Detailbetrachtung der Verbesserung

Nach einer Betrachtung der Verbesserung über die gesamte Oberfläche, soll eine Detailbetrachtung erfolgen. Bild 68 zeigt auf der Kugelfläche im Detail die Unterschiede zwischen Sensorrotation, klassischer Messung und simulierten Solldaten. Letztere wurden auf Basis der Kalibrierdaten mit der gleichen Strategie und dem gleichen Tastelement berechnet. Bei Abweichung der kalibrierten Radien von den tatsächlichen lokal gültigen Radien kann deshalb eine systematische Abweichung im Nanometerbereich auftreten. In Bild 68 wurde eine

ungleiche Achsenskalierung gewählt, so dass bei allen real durchgeführten Messungen Unterschiede zur simulierten Idealkontur sichtbar sind. Bei den Scans mit Rotationsprinzip sind Unstetigkeiten zu erkennen, die im Abstand von 100 µm auftreten, also nach Durchführung einer Rotation. Diese Unstetigkeiten sind bei Verwendung der Kurzzeitkalibrierung weniger stark ausgeprägt, bei Verwendung des festen Kalibrierfeldes treten hingegen Sprünge von 1 µm bis zu 2 µm auf. Es zeigt sich der Vorteil einer Kurzzeitkalibrierung bei Langzeitveränderungen an Kinematik und Aufbau. Die verbleibenden Sprünge von bis zu 500 nm bei Kurzzeitkalibrierung können wie schon bei der Wendeschneidplatte primär auf ein zu geringes Winkelaktualisierungsintervall zurückgeführt werden.

Ebenfalls auffällig ist eine Abweichung des erfassten Radius, insbesondere sichtbar im Bereich des Kugelpols. Dort zeigen alle real aufgenommenen Messdaten eine negative Abweichung zum Sollprofil, was äquivalent zu einem niedriger erfassten Oberflächenpunkt ist. Selbst die klassische Messung zeigt bis zu 1 µm Abweichung, was auf eine Abweichung vom kalibrierten Radius der Kalibrierkugel oder Tastkugel hinweist. Bei Positionen jenseits von ± 1 mm hingegen, wenn die Stellbegrenzung greift, verschwindet bei der Messung ohne Kurzzeitkalibrierung der Unterschied zur Sollkontur, was auf einen lokal abhängigen Radius, das heißt eine Formabweichung von der Kugelform hindeuten würde. Bei Erreichen der Stellbegrenzung bleibt der Kontaktpunkt auf der Tastkugel nicht mehr konstant und wandert aus. Dieser Effekt kann entstehen, wenn die Tastkugel im Antastpunkt größer ist als ihr mittlerer Radius. Eine spätere Betrachtung der Tastkugelform, Bild 69, kann diese Annahme bekräftigen. Die Messung mit Kurzzeitkalibrierung zeigt dieses Verhalten jedoch weniger stark ausgeprägt und lässt hingegen eine thermische Drift vermuten. Die Tatsache, dass sich alle drei Profile im Polbereich überlappen, spricht wiederum für eine Formabweichung bzw. eine Überlagerung beider Effekte.

Von Interesse ist zudem die Abweichung an der Stelle 0 mm, die sich bei allen Messungen zeigt und die auch bei anderen Messreihen sichtbar ist. Dies lässt eine lokale Abplattung der Kalibrierkugel am Pol vermuten, welche sich bei der Kalibrierung in Bild 62 mit 186 nm erkennen lässt. Aufgrund dieser Erkenntnis und der systematischen Abweichung empfiehlt sich die Nutzung einer Kalibrierkugel und einer Tastkugel von höherer Formgenauigkeit.

8.4 Grenzen des Verfahrens und Bewertung der Unsicherheit

Das Verfahren zeigt in der Simulation sowie in der Praxis eine signifikante Verbesserung der Oberflächenerfassung und des nutzbaren Winkelbereiches. Es bleibt zu klären, bis zu welchem Punkt die Nutzung des Rotationsverfahrens sinnvoll ist. Dieser Grenzbereich tritt ein, wenn die Abweichung, die durch den Winkelwechsel auftritt, größer ist, als die Verbesserung durch Neigung. Zu diesem Zweck sollen die Abweichungsursachen im Aufbau und die resultierende Unsicherheit bei der Messung mit dem Rotationsprinzip betrachtet werden. Nach Identifikation aller beteiligten Faktoren kann eine kombinierte Standardunsicherheit aus der Überlagerung dieser Einzelbeiträge abgeschätzt werden. Unsicherheit ist nach [VIM 2012] definiert als „Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden können." Die Einzelbeträge können als Unsicherheitskomponenten vom Typ A durch Auswertung über die Analyse statistischer Messreihen oder vom Typ B durch andere Mittel als der statistischen Analyse ermittelt werden. Die Berechnung hat hierbei nach den Richtlinien des GUM zu erfolgen, [GUM 2008]. Im Folgenden werden die bekannten Einflüsse und ihre Beträge dargestellt.

Wiederholpräzision Rotationskinematik

Einer der wesentlichen Beiträge resultiert aus der abweichungsbehafteten wiederholten Positionierung der Rotationskinematik, bzw. genauer gesagt, der Wiederholpräzision der Sensorpositionierung im Raum. Über die beschriebene Kalibrierstrategie lässt sich dessen Position einmalig bestimmen und im Kalibrierfeld ablegen. Eine Abweichung bei der Messung tritt auf, wenn bei der wiederholten Adressierung einer Position der Sensor von der gespeicherten Position abweicht, sei es durch unbekannte systematische oder zufällige Komponenten. Für die Wiederholpräzision wurde in den Eingangsuntersuchungen nach Kompensation der Hysterese eine Mehrfachtaster-Ortsabweichung P_{LTE} von 137,6 nm (X), 99,4 nm (Y) und 86,3 nm (Z) über den Arbeitsbereich bestimmt. Winkelabhängig wurden auch bessere Werte realisiert. Die Spannweite der Werte wird hierzu in eine Standardunsicherheit überführt unter der Annahme einer Gleichverteilung. Nach GUM, Kapitel 4.3.7, wird bei ausschließlicher Kenntnis von Minimal- und Maximalwerten eine Gleichverteilung angenommen, eine Betrachtung der vorhandenen Daten widerlegt diese konservative Annahme nicht. Die Standardunsicherheit resultiert demnach durch Division der Weite durch $\sqrt{12}$. Es ergibt sich nach GUM für die Z-Position des Sensors durch Multiplikation der Standardunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor k = 1,65 bei Gleichverteilung ein 95% Konfidenzintervall von ± 41 nm. Wenn der Sensor nach Rotation um diesen Betrag in der Z-Achse abweicht, so würde in der resultierenden Messung eine Abweichung gleichen Betrags auftreten. Dieser Wert wird primär von der Wiederholpräzision der Rotationskinematik bestimmt und eine Verbesserung wäre durch Wahl anderer Drehachsen oder einer anderen Kinematik möglich.

Formabweichung und Radius von Kalibrierkugel und Sensorkugel

Der zweite Haupteinfluss liegt in der Formabweichung der Kugeln. Beim Einmessen der Sensorposition zum Kalibrierartefakt überlagern sich die Form von Kalibrierkugel und Sensorkugel. Dadurch verschieben sich die bei der Gaußschen Einpassung berechneten Mittelpunkte zu den erwarteten Mittelpunkten. Dieser Einfluss hat durch die Rotation während der Kalibrierung einen unterschiedlichen Betrag und ergibt sich aus der lokalen Formüberlagerung der beiden Kugeln. Um diesen Effekt erfassen zu können, ist eine Kalibrierung beider Kugeln mit einer Punktdichte notwendig, die den später genutzten Winkelschritten ausreichend entspricht. Eine worst-case Betrachtung ergibt sich bei positiver Überlagerung der maximalen Formabweichung beider Kugeln an einem Kontaktpunkt. Eine Addition der kalibrierten Formabweichung beider Kugeln von ± 572 nm respektive ± 307 nm resultiert im Maximum zu 879 nm. Bei der Bestimmung der Kugelmittelpunkte würde dieser Wert nur anteilig eingehen durch die Gaußsche Einpassung, für eine exakte Bestimmung der Verschiebung wird die genaue Kenntnis der Formabweichung benötigt. In Konsequenz resultiert eine unbekannte systematische Abweichung der Korrekturvektoren im Kalibrierfeld. Für den ermittelten Wert von P_{LTE} hat dies einen vernachlässigbaren Einfluss, da die winkelabhängige Verschiebung den erfassten Mittelpunkt während der Bestimmung von P_{LTE} in gleichem Maße beeinflusst, wie die als Sollwert geladenen Korrekturvektoren. P_{LTE} kann damit weiterhin als eine quantitative Angabe für die zufällige Positionsabweichung der Rotationskinematik verwendet werden.

Ein zweiter Effekt aufgrund Formabweichung kommt während einer Messung bei der Berechnung des Antastvektors zum Tragen, da hier von einem konstanten Radius ausgegangen wird. Im worst-case kann bei ungünstiger Lage der Sensorkugel der erfasste Höhenwert um bis ± 307 nm verschoben werden. Zusätzlich zur Formabweichung ist die Unsicherheit

der Radienkalibrierung zu nennen, die vom verwendeten KMG und dem Werth Fiber Probe abhängt. Generell zeigt sich bei beiden verwendeten Kugeln Optimierungspotenzial. Bei der Kalibrierkugel ist in diesem Kontext die allgemeine Formabweichung, wie schon in Bild 62 gezeigt, zu nennen, sofern diese primär von der Kugel herrührt. Die Nutzung einer anderen Kugel mit geringerer Formabweichung ist anzuraten. Bei der Sensorkugel soll bezüglich der Formabweichung folgende lichtmikroskopische Aufnahme und die Darstellung der Residuen betrachtet werden, Bild 69 links und rechts.

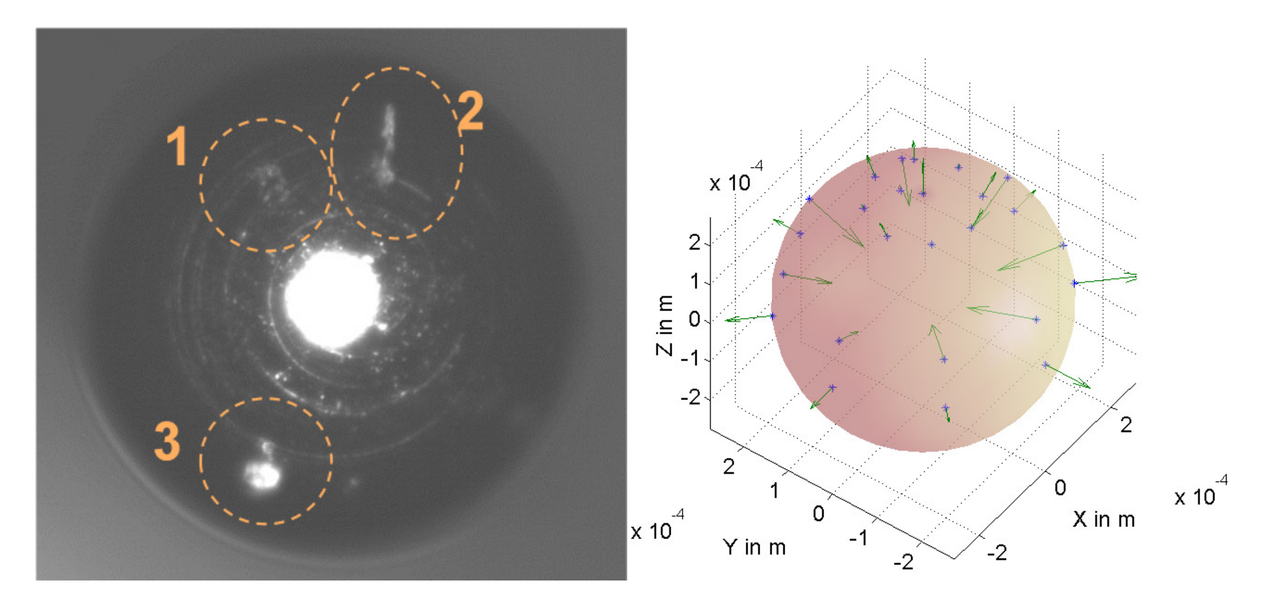


Bild 69: Links: Lichtmikroskopische Aufnahme der Sensorkugel (heller zentraler Fleck resultiert durch Reflexion der Beleuchtung). Rechts: Residuen der Antastpunkte auf dem Kugelartefakt (ohne Tastkugelradiuskorrektur). Abweichungen 500-fach überhöht dargestellt

Auf der Kugel lassen sich konzentrische Riefen vom Herstellungsprozess sehen, zudem lassen sich im oberen Bereich zwei Veränderungen oder Kratzer erkennen, Markierung eins und zwei, sowie im unteren Bereich ebenfalls eine weitere, Markierung drei. Die Tastermitte kann wegen der Reflexion der Beleuchtung nicht bewertet werden. Die Ursache der Kratzer ist nicht bekannt, jedoch wurden bei [HOFFMANN 2009] mehrere Taststifte gleicher Bauart mittels eines Rasterelektronenmikroskops untersucht und es konnten vergleichbare Kratzer im Auslieferungszustand der Taster gesehen werden. In Bild 69 rechts lässt die Verteilung der Residuen eine symmetrische Formabweichung erkennen, wie sie resultieren würde, wenn entweder Hartmetallkugel oder die Antastkugel während der Kalibrierung zu einer ovalen Form neigt. Um Taststifte mit geringerer Formabweichung zu erhalten, müsste anstatt Hartmetallkugeln auf Rubinkugeln ausgewichen werden, die sich präziser herstellen lassen. In einem anschließenden Sputtering-Prozess müssen diese mit einer dünnen Goldschicht leitfähig gemacht werden. Zudem könnte mittels eines Drei-Kugel-Tests die lokale Formabweichung bestimmt werden für eine winkelabhängige Berechnung des Antastvektors [KÜNG U.A. 2007].

Umwelteinflüsse

Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, elektromagnetische Felder und insbesondere thermische Effekte spielen in der Messtechnik eine große Rolle. Gerade in der Nanomesstechnik kann die thermische Ausdehnung von Werkstück und Messgerät Abweichungen in der Größenordnung der zu prüfenden Merkmale liegen. In Bezug auf das Rotationsprinzip können sich thermische Veränderungen an mehreren Stellen auswirken. Am kritischsten ist eine Grö-

ßenänderung von Kalibrier- oder Sensorkugel, was zu einer systematischen Abweichung durch veränderte Korrekturradien führt. Zudem wird das Kalibrierfeld von den Längenänderungen in der Rotationskinematik sowie einer Wanderung der Kalibrierkugel im Gerätekoordinatensystem betroffen. Mit einer Kurzzeitkalibrierung können diese Effekte jedoch gesenkt werden. Durch die durchgängige Verwendung von Komponenten mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurde dieser Effekt konstruktiv schon begrenzt, er ist aber dennoch vorhanden. Zur Abschätzung des Einflusses wurde die Temperaturveränderung über längere Zeit betrachtet. Einer der installierten Temperatursensoren ist in Nähe des Werkstücks installiert und zeigte zwischen Aufzeichnung des statischen Kalibrierfeldes und der letzten Messung mittels Sensorrotation einen Anstieg um 0,4 K. Mit Kenntnis der Geometrie der Rotationskinematik, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der installierten Bauteile und der Annahme, dass diese von der Temperaturerhöhung betroffen waren, konnte eine Bewegung des Sensors von 1,1 µm auf das Werkstück zu berechnet werden. Eine eventuelle Aufheizung durch die Achsantriebe der Rotationskinematik ist hier nicht berücksichtigt. Die größte Ausdehnung erfolgt mit zusammen 1 µm in den Achsen selbst, insbesondere in der Aerotech Achse aus Aluminium und der darauf installierten Adapterscheibe aus Aluminium. Die restlichen Komponenten kommen durch Verwendung von Materialien mit geringen Ausdehnungskoeffizienten oder ihre geringe Abmessung, wie die Isolierschicht aus Kunststoff zwischen Werkstück und Spiegelecke, auf nur 0,1 µm. Die 1,1 µm würden im Einklang mit den Werten der Kurzzeitkalibrierung in Bild 68 stehen, verglichen mit dem statischen Kalibrierfeld. Nur die Übereinstimmung beider Messungen am Kugelpol kann diese Annahme nicht durchgängig bestätigen. Die Kalibrierung von Kugelartefakt und Tastkugel erfolgte bei einer Temperatur von 20,0° Celsius, beide haben damit im eingebauten Zustand einen Unterschied von 1,9 K erfahren. Gegenüber dem kalibrierten Wert ergibt sich für das Kugelartefakt eine Vergrößerung von 80 nm und für die Tastkugel 3 nm. Generell kann durch Betrieb in einem Messraum, ausreichende Temperierungszeit und die Verwendung der Kurzzeitkalibrierung dieser Effekt beherrscht werden.

Strategie des Rotationsprinzips

Zusätzliche Beiträge zur Abweichung bei der Rotation resultieren aus der verwendeten Strategie. Abhängig von ihrem Typ, dem gewähltem Algorithmus, der eingestellten Aktualisierungsrate und den konfigurierten Stellbegrenzungen kann ein suboptimaler Winkel berechnet werden. Die resultierende Abweichung hängt in letzter Instanz vom Akzeptanzbereich des verwendeten Sensors ab. Sie wurde im Simulationsteil behandelt und zeigt sich auch bei den tatsächlichen Messungen, insbesondere wenn das Aktualisierungsintervall für die Winkelanpassung zu breit konfiguriert ist. Durch häufigere Neuberechnung und Wahl der Strategie kann dieser Effekt gesenkt werden, bis er ausreichend gering ist.

Auflösung der Winkelansteuerung

Ebenfalls vom Sensorakzeptanzwinkel abhängig ist der Effekt des kleinsten von der Kinematik durchführbaren Winkelschritts. Je feiner dieser ist, desto besser kann die Orthogonalität zwischen Sensor und Oberfläche erreicht werden. Durch die Tatsache, dass der Akzeptanzbereich von Profilometern bei wenigen Grad liegt und eine Sensorrotation in diesem Fall keinen signifikanten Vorteil zeigt, hat eine Winkeleinstellung deutlich feiner als 1° nur einen begrenzten praktischen Nutzen. Zum Beispiel würde bei der gezeigten Messung auf dem Kugelartefakt eine Drehung von 0,2° zu einer Abweichung von 1 nm führen und eine Drehung von 0,5° zu einer Abweichung von 5 nm.

Ausrichtung Werkstückkoordinatensystem zu Gerätekoordinatensystem

Durch die Verwendung von nur einer Kugel zur Definition des Ursprungs des Werkstückkoordinatensystems werden nur die drei translatorischen Freiheitsgrade erfasst, nicht jedoch eine Verdrehung. Diese ist durch die Verschraubung des Werkstückträgers mit der Spiegelecke der NMM-1 während einer Messung gesperrt, jedoch kann bei einer Neumontage des Werkstückträgers eine bestimmte Position im Werkstückkoordinatensystem nicht wiederholt getroffen werden. Bei den gezeigten Messungen hatte dies keinen Einfluss.

Positionsunsicherheit der NMM-1

Neben der Rotationskinematik ist auch die Unsicherheitskomponente für die Positionsmessung in der NMM-1 zu betrachten. Dieses komplexe Thema wurde in [HAUSOTTE 2002] und [HAUSOTTE 2011] behandelt. Für die Position der Spiegelecke wurde für die ältere Version der NMM-1 eine Unsicherheit von 13,24 nm in der xy-Ebene und 14,32 nm in der z-Achse (k=2) angegeben, [HAUSOTTE 2002]. Neuere Arbeiten für ein aktualisiertes Gerät geben einen Wert im Bereich von 3 nm an [JÄGER U.A. 2009]. Die Messung einer Stufenhöhe von 2 mm mit einem Fokussensor erfolgte hier mit einer Unsicherheit von 2,7 nm (k=2). Mit der Kenntnis des Einflusses des Tastsystems kann den neuesten Arbeiten nach eine Berechnung für eine spezifische Messung erfolgen, [HAUSOTTE 2011]. Für den genutzten Revisionsstand der NMM-1 wird nach [JÄGER U.A. 2009] von 3 nm (k=2) ausgegangen. Im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren ist dieser Betrag gering.

Einfluss durch den Sensor

Zuletzt ist der verwendete Sensor zu betrachten, für dessen Betrieb von einem festen Arbeitsabstand bei einer gewählten Signalstärke ausgegangen wird. Der tatsächliche Abstand wird durch Schwankung der Spitzenspannung, Verstärkerrauschen und nicht erfasste Wechselwirkung in der Wirkzone beeinträchtigt. Weitere Einflussgrößen, die sich über längere Zeit als Drift bemerkbar machen können, sind die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit in der Wirkzone, die die effektive Austrittsarbeit der Elektroden verändern. Durch die Klimaregelung im Messraum werden beide Parameter kontrolliert. In den messtechnischen Untersuchungen bei Hoffmann wurde für die Reproduzierbarkeit der Antastung in 1D 22 nm (k = 2) und 3D 60 nm (k=2) ermittelt. Diese Werte waren damals jedoch noch von erhöhter mechanischer Schwingung der NMM-1 überlagert, die im Rahmen der Modernisierung der NMM-1 deutlich reduziert wurde. Als aktuellerer Wert kann, resultierend aus der Bestimmung des Artefaktmittelpunkts, eine Wiederholstandardabweichung in Z von σ_r = 5,0 nm angenommen werden, siehe Kapitel 8.2.

Kombinierte Unsicherheit

Zusammenfassend kann für die Messgröße Höhe des Werkstücks eine Überlagerung der dargestellten Unsicherheitsbeiträge angenommen werden. Der Beitrag durch die Formabweichung ist durch die Richtungsabhängigkeit erschwert zu berücksichtigen und es können nur theoretische Maximalwerte angegeben werden. Zur korrekten Berücksichtigung ist eine Formmessung mit höherer Punktdichte und geringerer Antastabweichung des zur Kalibrierung verwendeten Sensors notwendig. Diese Unsicherheitskomponente kann in der kombinierten Unsicherheit deshalb nicht berücksichtig werden. Da zudem für die große Kalibrierkugel prinzipiell Exemplare mit einer Formabweichung im Nanometerbereich verfügbar sind, an denen die Formabweichung der kleineren Sensorkugel bestimmt werden kann, kann diese Unsicherheitskomponente prinzipiell bestimmt, sowie im Vergleich zur jetzigen Realisie-

rung gesenkt werden. Unter dieser Prämisse beschreibt die resultierende kombinierte Unsicherheit die Unsicherheit, die mit dem Rotationsprinzip und dem Aufbau möglich ist.

Zur Berechnung der kombinierten Unsicherheit soll deshalb für kurze Zeiträume eine Überlagerung des Beitrags der Kinematik, der NMM-1 und des Sensors herangezogen werden. Für längere Zeiträume sind zusätzlich schwankende Umwelteinflüsse zu betrachten. Dem GUM nach sind zur Berechnung der kombinierten Unsicherheit die Beiträge quadratisch zu addieren und gemeinsam zu radizieren. Eine Betrachtung des Ergebnisses mit der Software GUM Workbench ergibt für die Höhe des Werkstücks in Z eine erweiterte Unsicherheit von ± 42 nm (k=1,65). Da die Komponente der Rotationskinematik hierbei das Resultat dominiert mit einem Index von 95,8%, wird als resultierende Verteilungsform ebenfalls eine Gleichverteilung angenommen.

Unsicherheitsbeiträge	**Standardabweichung**	**Verteilung**	**Index**
Wiederholpräzision Rotationskinematik	24,9 nm	Rechteck	95,8 %
Positionsunsicherheit der NMM-1	1,5 nm	Normal	0,3 %
Einfluss durch den Sensor	5,0 nm	Normal	3,9 %
Erweiterte kombinierte Unsicherheit für „Höhe des Werkstücks in Z“: ± 42 nm (k=1,65)			

Weitere Einflußfaktoren (Bewertung erfolgt im jeweiligen Abschnitt)
Formabweichung und Radius von Kalibrierkugel und Sensorkugel
Umwelteinflüsse
Strategie des Rotationsprinzips
Auflösung der Winkelansteuerung
Ausrichtung Werkstückkoordinatensystem zu Gerätekoordinatensystem

Tabelle 10: Überblick der Unsicherheitsbeiträge

Als Empfehlung für die Einsatzschwelle des Rotationsverfahrens kann der Oberflächenwinkel eines Werkstücks angegeben werden, ab dem die Abweichung einer klassischen Messung den Wert von 42 nm überschreitet, bzw. 41 nm ohne Berücksichtigung des elektrischen Tastsystems. Idealerweise wird eine Rotation erst bei Überschreiten dieses Grenzwinkels aktiviert und flachere Winkel werden mit einer klassischen 0° Ausrichtung gemessen. Der Grenzwinkel ist oberflächen- und spitzenabhängig, für das gezeigte Beispiel der Kugelmessung und einer maximalen Abweichung durch das Rotationsprinzip von ± 41 nm in Z liegt er bei ± 1,4°.

8.5 Rückführung der Ergebnisse auf die Simulation

Abschließend wurden die Erkenntnisse aus dem praktischen Betrieb und insbesondere die tatsächlich erzielbare Wiederholpräzision der Positionierung zurück in die Simulation geführt. Die Berechnung eines Rotationswinkels wurde im Bereich von 0° Rotation um den intelligenten Wechsel von klassischer Messung zu Sensorrotation erweitert, wenn die Abweichungsreduktion die Unsicherheit der Positionierung überschreitet.

Dieser Ansatz ist in Verbindung mit einer analysierenden Strategie mit dem Average-Slope Algorithmus, siehe Kapitel 4.3, in Bild 70 bei der simulierten Messung eines Mikrokonturnormals demonstriert. Dieses besteht aus geometrischen Basiselementen unterschiedlicher Größe, sowohl in erhabener Form als auch vertieft, [PTB 2006]. Durch die hohen Aspektverhältnisse ist eine vollständige profilometrische Messung stark abweichungsbehaftet. Gegenüber Bild 24 wurde die Anzahl der Elemente reduziert, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

Als Tastelement kam eine konische Spitze mit 2 µm Spitzenradius und 90° Öffnungswinkel zum Einsatz. Zusätzlich wurde als Neuerung eine profilabhängige Stellbegrenzung mit einem maximalen Drehwinkel von ± 30° eingeführt, die das Problem der Flankenkollision reduziert. Dazu wird eine Schar von Simulationen bei unterschiedlichen maximalen Winkeln hinsichtlich der erzielbaren Abweichung zum Sollprofil bewertet. Es resultiert für jeden Oberflächenpunkt der Rotationswinkel, bei dem die geringste Abweichung auftritt. Dieser Optimierungsschritt wurde exemplarisch mit den Winkeln ± 30°, ± 20°, ± 10° und der klassischen Messung bei 0° durchgeführt. Ein Neigungswinkel größer ± 30° würde wegen zu vielen Flankenkollisionen keine weitere Verbesserung bringen. Die Abweichung aller erfassten Oberflächenpunkte wurde zusätzlich um 41 nm in Z erhöht, um der Unsicherheit gerecht zu werden.

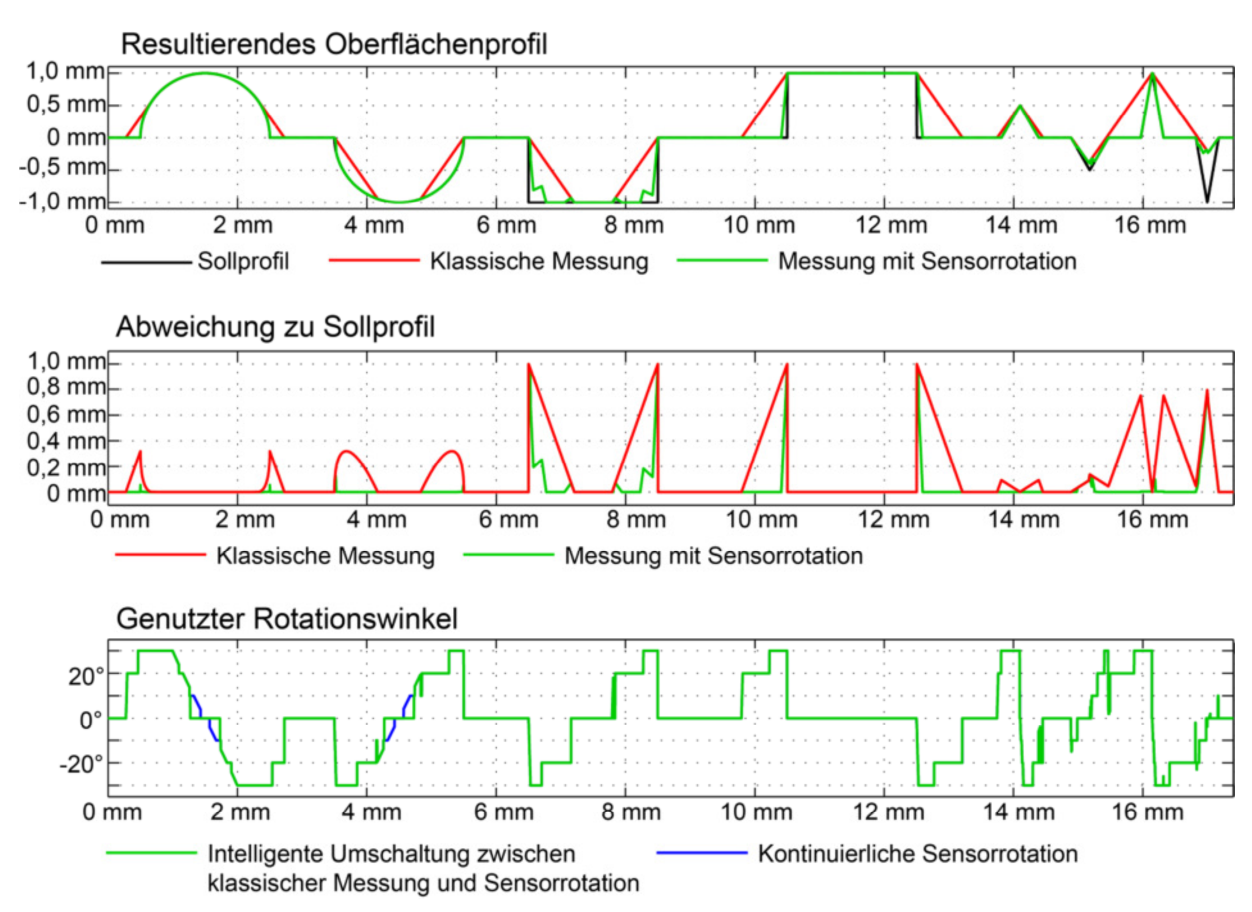


Bild 70: Simulation Mikrokonturnormal

Im resultierenden Oberflächenprofil ist gegenüber einer klassischen Messung der Vorteil der Sensorrotation erneut klar sichtbar. Alle Strukturen werden deutlich klarer abgebildet. Nur in den Ecken von inverser Stufe und inversem Dreieck gelangt durch die Unzugänglichkeit der Struktur auch das Rotationsprinzip an die Grenze. Bis auf Ecken und Übergänge liegen die verbleibenden Abweichungen zum Sollprofil unter 1 µm. Die genutzten Rotationswinkel sind im letzten Teilgraph zu sehen für die Messung mit intelligenter Umschaltung in der Nähe von 0°, sowie ohne diese Funktion. Die klassische Messung mit 0° kommt nur bei der Kugel und der Spitze der Dreiecke zum Tragen, sichtbar an den unterschiedlichen Winkelverläufen bei der Position 1,5 mm und 4,5 mm. Im generellen Winkelverlauf ist auch der wiederholte Sprung zwischen unterschiedlichen maximalen Winkeln zu sehen sowie eine Neigung zur Oszillation, bei z.B. der Position 15,5 mm. Bei Betrachtung der Quadratsumme der Abweichungen bringt die Sensorrotation im Vergleich zur klassischen Messung trotz der hohen Aspektverhältnisse des Mikrokonturnormals eine Abweichungsreduktion um 84,5%.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren für die Mikro- und Nanomesstechnik basierend auf der Rotation eines Sensors gezeigt und bewiesen. Es senkt die Messabweichung bei der Erfassung von stark gekrümmten Oberflächen, die auf das Überschreiten eines zulässigen Winkeltoleranzbereichs eines Sensors zurückzuführen ist. Das Verfahren erhöht den effektiv erfassbaren Winkelbereich mit einem Sensor und erlaubt, 1D Sensoren für 3D Messungen zu nutzen. Das Verfahren erfolgt während des Messvorgangs und macht eine nachträgliche Datenfusion aus mehreren Messungen oder z.B. eine computergestützte Korrektur der Spitzenform hinfällig. Einsatzbereiche sind die Messung von Schneidkanten an Werkzeugen, optische Linsen und Mikrolinsen, funktionale Oberflächen und mit dem LIGA-Verfahren hergestellte Bauteile.

Als Demonstrationsobjekt des Verfahrens wurde ein taktiles bzw. quasitaktiles eindimensionales Messprinzip aufgrund dessen Relevanz in der Mikromesstechnik und der guten Beherrschung der Abweichungsmechanismen ausgewählt. Das Verhalten wurde in einer eigens entwickelten Simulationsumgebung abgebildet, um die Abweichung bei rotiertem Sensor und beliebigen Oberflächen zu berechnen. Es wurden Strategien und Algorithmen basierend auf Vorwissen, Analyse oder Extrapolation des Profilverlaufs entwickelt, um einem spezifischen Oberflächenpunkt einen zugehörigen Rotationswinkel zuzuordnen.

In Versuchsplänen erfolgte die Simulation des Verfahrens auf Testoberflächen, basierend auf realen Werkstücken und geometrischen Grundelementen. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen die – je nach Profilverlauf und Tastelement – erheblichen zu erwartenden Verbesserungen der Abbildungstreue durch die Sensornachführung, sowie die Bereiche der Messobjekte, in welchen die Sensornachführung besonders nutzbringend ist.

Nach theoretischem Funktionsnachweis des Verfahrens erfolgte die Planung eines Prototyps zur Durchführung der Sensorrotation in der Praxis. Die Basis bildete ein Nanopositionier- und Nanomessgerät vom Typ SIOS NMM-1 mit einer Achsauflösung von 0,1 nm. Mehrere kinematische Ketten zur Realisierung einer Rotation des Sensors um seinen Arbeitspunkt wurden hinsichtlich der erzielbaren Wiederholpräzision verglichen. Als Optimum wurde eine Stapelung zweier Drehachsen unter 45° Neigung identifiziert, mit der in Verbindung mit Sensornachführung eine komplette Hemisphäre orthogonal angetastet werden kann.

Zur Steigerung der Wiederholpräzision der Kinematik wurde ein in-situ Kalibrierkonzept auf Basis eines quasi-taktilen Sensors mit elektrischer Nahfeldwechselwirkung implementiert, um systematische Führungsabweichungen der Rotationskinematik und Hysterese zu kompensieren. Eine überarbeitete und miniaturisierte Version des Sensors wurde in den Aufbau integriert und mit diesem ein Kalibrierfeld über den Rotationsbereich erfasst. Der Sensor erlaubt durch seine Kontaktlosigkeit beliebig geformte Spitzen bei Subnanometerauflösung in Arbeitsrichtung und der Möglichkeit in drei Dimensionen anzutasten. Durch Verwendung der Kalibrierstrategie auf Basis des Sensors konnte über den Rotationsbereich eine Ortsabweichung P_{LTE} nach ISO 10360:5 von ± 69 nm in Richtung des Profilschnitts erzielt werden. Quer dazu wurden ± 50 nm und in der Höhenachse ± 43 nm realisiert, was die technische Basis für eine Anwendung des Verfahrens in der Praxis sicherstellt.

Nach Integration der Drehachsen und des elektrischen quasi-taktilen Sensors in die NMM-1 auf mechanischer, elektrischer und softwareseitiger Ebene, wurde das Rotationsprinzip an Demonstratoren eingesetzt. In allen Fällen konnte die Messabweichung gegenüber einer

klassischen Messung ohne Rotation signifikant über die komplette Oberfläche gesenkt werden und der nutzbare Winkelbereich mit der Kinematik erhöht werden. Bei der Oberfläche eines Kugelartefakts konnte die auftretende winkelbedingte Abweichung in der Summe um 99 % gesenkt werden. Mit einer weiteren Steigerung der Genauigkeit des Prototyps ist eine theoretische Reduktion um 100 % denkbar. Unter Berücksichtigung der Messabweichung durch die Positioniergenauigkeit der Rotationskinematik ist ein Einsatz des Prinzips schon ab einem einstelligen Oberflächenwinkel sinnvoll, auf dem Kugeldemonstrator schon ab 1,4°.

Zusammenfassend kann durch Anwendung der Sensorrotation die Messabweichung auf gekrümmten Oberflächen aufgehoben werden, der Sensor jederzeit in seinem optimalen Arbeitswinkel gehalten werden und der nutzbare Winkelbereich eines Sensors effektiv auf ± 90° erhöht werden.

Als Ansatzpunkte für eine zukünftige Verbesserung konnten während der Arbeiten mehrere Punkte identifiziert werden. Die Hauptfaktoren sind die Wiederholpräzision der Rotationsachsen, die die erzielbare Genauigkeit maßgeblich bestimmen, und die Formabweichung der verwendeten Kalibrierkugel und der Sensorkugel. Durch Optimierung des elektrischen Sensors kann zudem dessen Auflösung und Reproduzierbarkeit gesteigert werden, z.B. durch Verbesserung des Signal/Rausch-Verhaltens mittels Einsatz einer triaxialen Schirmung. Dies senkt die Unsicherheit bei der Kalibrierung der Rotationsachsen weiter. Weiterführende Arbeiten im Ausblick wäre die Kombination des Rotationsprinzips mit einer computergestützten Korrektur der Tastelementform, um die Häufigkeit einer Winkelnachstellung zu reduzieren. Zudem können die Strategien Anforderungen von Rauheitsmessung berücksichtigen, wie z.B. unterbrechungsfreie Teilstrecken. Des Weiteren kann die Simulationsumgebung auf die simulierte Messung von 3D Flächen ergänzt werden, um die bestehenden Möglichkeiten der Rotationskinematik voll auszunutzen. In diesem Schritt kann der Simulatorkern unter Verwendung von Ansätzen, die bei Simulation von 5-Achs-Bearbeitungszentren zum Einsatz kommen, aktualisiert werden.

Ansätze zur Übertragung des Prinzips resultieren aus der durch Rotation gewonnenen 3D-Fähigkeit. 1D-Sensoren mit hoher lateraler Auflösung treten in Verbindung mit dem Verfahren bei geeigneter Ansteuerung in direkte Konkurrenz zu den heute verfügbaren 3D-Sensoren, den mikrotaktilen Tastsystemen. Auch eine Kombination des Rotationsprinzips mit mikrotaktilen Systemen bringt Vorteile durch die geschaffene Zugänglichkeit von Hinterschneidungen und die Messung in Mikrolöchern. Neben einer weiteren Optimierung des Prinzips erscheint die Übertragung auf weitere Sensoren mit anderen Wirkungsprinzipien nur eine logische Konsequenz, wie z.B. optische Punkt- und Flächensensoren und Rastersondenverfahren. Die Anwendbarkeit erstreckt sich damit auf den Großteil der heutzutage genutzten punktuellen Verfahren der dimensionellen Mikromesstechnik und verschafft dem Anwender einen Genauigkeits- und Zeitgewinn bei einem erweiterten Bauteilspektrum.

10 Literaturverzeichnis

[ALICONA 2012]
ALICONA, http://www.alicona.at/home/produkte/infinitefocus-real3d.html, aufgerufen 7.11.1012

[ALTING U.A. 2003]
Alting, L. Kimura, F., Hansen, H.N. und Bissacco, G.: Micro engineering. In: *Annals of the CIRP* 52/2 (2003), S. 635-657

[ANDERSSON U.A. 2007]
ANDERSSON, P., KOSKINEN, J., VARJUS, S., GERBIG, Y., HAEFKE, H.: GEORGIOU, S., ZHMUD, B. UND BUSS, W.: Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces. In: *Wear* 262 (2007), S. 369-379

[ANT95-R]
AEROTECH: ANT95-R Series Stage User's Manual, Benutzerhandbuch, Revision 1.05.00, 2011

[BEAUCAMP U.A. 2007]
BEAUCAMP, A.T.H., FREEMAN, R., MORTON, R. UND WALKER, D.D.: Metrology Software Support for Free-Form Optics Manufacturing. In: http://www.zeeko.co.uk/site/tiki-index.php?page=Publication+List, aufgerufen 02.12.2012

[BECKER 1986]
BECKER, E. W., EHRFELD, W., HAGMANN, P., MANER, A. UND MÜNCHMEYER, D.: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanoforming, and plastic moulding (LIGA process). In: *Microelectronic Engineering* 4/1 (1986), S. 35-56

[BERNDT U.A. 1968]
BERNDT, G., HULTZSCH, E. UND WINHOLD, H.: Funktionstoleranz und Meßunsicherheit. In: *Wissenschafltiche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17 (1968), S. 465-471

[BINNIG U. ROHRER 1983]
BINNIG, G. UND ROHRER, H.: Scanning tunneling microscopy. In: *Surface Science* 126 (1983), S. 236 - 244

[BHUSHAN 2003]
BHUSHAN: *Handbook of Nanotechnology*. Springer Verlag, Berlin, 2003

[BISSACCO U.A. 2008]
BISSACCO, G., HANSEN, H.N. UND SLUNKSY, J.: Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. In: *Annals of the CIRP* 57/1 (2008), S.113-116

[BLUNT U.A. 2008]
BLUNT, L., JIANG, X. UND SCOTT, P.: Structured Surfaces; a New Paradigm in Surface Metrology. In: *12th International Colloquium on Surfaces* (28.-29.1.2008), S. 403-410

[BOS U.A. 2009]
BOS, E.J.C., SCHELLEKENS, P.H.J. UND DIETZEL, A.H.:, Aspects of tactile probing on a micro scale. In: *Proceedings of the euspen International Conference (San Sebastian 2009)*

[BOS 2010]

BOS, E.J.C.: Aspects of tactile probing on the micro scale. In: *Precision Engineering* 35/2 (2011), S. 228-240

[BRONSTEIN 2008]

BRONSTEIN, I.N.: *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 2008

[BUKHARAEV 1998]

BUKHARAEV, A.A., BERDUNOV, N.V., OVCHINNIKOV, D.V. UND SALIKHOV, K.M.: three-dimensional probe and surface reconstruction for atomic force microscopy using a deconvolution algorithm. In: *Scanning Microscopy* 12/1 (1998), S. 225-234

[BÜTEFISCH U. BÜTTGENBACH 1999]

BÜTEFISCH, S. UND BÜTTGENBACH, S.: Silicon Three-Axial Tactile Force Sensor (Taktiler Dreikomponenten-Kraftsensor), In: *Technisches Messen* 66/5 (1999), S. 185-190

[BÜTTGENBACH U.A. 2006]

BÜTTGENBACH, S., BRAND, U., BÜTEFISCH, S., HERBST, CH., KRAH, T., PHATARALAOHA, A. UND TUTSCH, R.: Taktile Sensoren für die Mikromesstechnik. In: *VDI Berichte* 1950 (2006), S. 109-118

[BYRNE U.A. 2003]

BYRNE, G., DORNFELD, D. UND DENKENA, B.: Advancing cutting technology. In: *Annals of the CIRP* 52/2 (2003), S. 483-507

[CLAVERLEY U. LEACH 2010]

CLAVERLEY, J.D. UND LEACH, R.K.: A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures. In: *Microsyst Technol* 16 (2010), S. 1507–1512

[CUI U.A. 2012]

CUI, J., LI, L. UND TAN, J.: Opto-tactile probe based on spherical coupling for inner dimension metrology. In: *Meas. Sci. Technol*. 23 (2012), ID 085105

[DAI U.A. 2009]

DAI, G., BÜTEFISCH, S., POHLENZ, F. UND DANZEBRINK, H.-U.: A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes. In: *Meas. Sci. Technol*. 20/8 (2009), ID 084001

[DANZEBRINK U.A. 2006]

DANZEBRINK, H.-U., KOENDERS L., WILKENING G., YACOOT A. UND KUNZMANN H.: Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology. In: *Annals of the CIRP* 55/2 (2006), S. 841-878

[DE CHIFFRE U. HANSEN 1995]

DE CHIFFRE, L. UND HANSEN, H.N.: Metrological Limitations of Optical Probing Techniques for Dimensional Measurements. In: *Annals of the CIRP* 44/1 (1995), S. 501-504

[DIN 5401 2002]

Norm DIN 5401 2002. *Wälzlager - Kugeln für Wälzlager und allgemeinen Industriebedarf*

[DIN 55350-13 1987]

Norm DIN 55350-13 1987. *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*

[DIN EN ISO 3274 1997]
Norm DIN EN ISO 3274 1997. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*

[DIN EN ISO 4287 2012]
Norm DIN EN ISO 4287 2012. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*

[DIN EN ISO 10360-1 2003]
Norm DIN EN ISO 10360-1 2003. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe*

[DIN EN ISO 10360-3 2000]
Norm DIN EN ISO 10360-3 2000. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmeßgeräte (KMG) - Teil 3: KMG mit der Achse eines Drehtisches als vierte Achse*

[DIN EN ISO 10360-5 2011]
Norm DIN EN ISO 10360-5 2011. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 5: Prüfung der Antastabweichungen von KMG mit berührendem Messkopfsystem*

[DIN EN ISO 13565-1 1998]
Norm DIN EN ISO 13565-1 1998. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen*

[DIN EN ISO 25178-601 2011]
Norm DIN EN ISO 25178-601 2011. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster)*

[DIN ISO 230-1 1997]
Norm DIN ISO 230-1 1997. *Werkzeugmaschinen - Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten*

[DIN ISO 5725-1 1994]
Norm DIN ISO 5725-1 1994. *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe*

[EDWARDS U.A. 1993]
EDWARDS, C.A., PRESBY, H.M. UND DRAGONE, C.: Ideal Microlenses for Laser to Fiber Coupling. In: *Journal of Lightwave Technology* 11/2 (1993), S. 252-257

[FANG U.A. 2010]
FANG, F.Z., XU, Z.W., HU, X.T., WANG, C.T., LUO, X.G. UND FU, Y.Q.: Nano-photomask fabrication using focused ion beam direct writing. In: *CIRP Annals* 59/2 (2012), S. 543-546

[FEYNMANN 1959]
FEYNMANN, R. P.: Plenty of Room at the Bottom. Vortrag am California Institute of Technology, (1959). http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html, aufgerufen 11.11.2012

[FOUCHER U.A. 2011]
FOUCHER, J., FAURIE, P., DOURTHE, L., IRMER, B. UND PENZKOFER, C.: Hybrid Metrology & 3D-AFM Enhancement for CD Metrology Dedicated to 28 nm Node and Below Requirements. In: *AIP Conf. Proc.* 1395 (2011), S. 290-297

[GAO U.A. 2008]
GAO, F. LEACH, R. K., PETZING, J. UND COUPLAND, J. M.: Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers. In: *Meas. Sci. Technol*. 19 (2008), ID 015303

[GEIGER U. KOTTE 2008]
GEIGER, W., KOTTE, W.: *Handbuch Qualität, Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven*. Springer Verlag, Heidelberg, 2008

[GOCH 2003]
GOCH, G.: Gear metrology. In: *Annals of the CIRP* 52/2 (2003), S.659-695

[GÜNTHERODT U. WIESENDANGER 1992]
GÜNTHERODT, H.-J. UND WIESENDANGER, R.: *Scanning Tunneling Microscopy I, Springer Series in Surface Sciences 20*, Springer Verlag, Heidelberg, 1992

[GUIJUN U.A. 1998]
GUIJUN, J., SCHWENKE, H. UND TRAPET, E.: Opto-tactile sensor for measuring small structures on coordinate measuring machines. In: *ASPE Proceedings* 18 (1998), S. 25-28

[GUM 2008]
JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008

[HANSEN U.A. 2006]
HANSEN, H.N., CARNEIRO, K., HAITJEMA, H. UND DE CHIFFRE, L.: Dimensional micro and nano metrology. In: *Annals of the CIRP* 55/2 (2006), S. 721-743

[HÄßLER-GROHNE U.A. 2011]
HÄßLER-GROHNE, W., HÜSER, D., JOHNSEN, K.-P., FRASE, C. G. UND BOSSE, H.: Current limitations of SEM and AFM metrology for the characterization of 3D nanostructures. In: MST 22 (2011), id 094003

[HAUSOTTE 2002]
HAUSOTTE, T: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Verlag Isle, Ilmenau, Dissertation, 2002

[HAUSOTTE 2011]
HAUSOTTE, T.: *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*. Ilmenau. Techn. Univ. Habilitationsschrift. Pro Business. - ISBN 978 - 3- 86805 - 948 - 9 , 2011

[HENEIN U.A. 2003]
HENEIN, S., SPANOUDAKIS, P., DROZ, S., MYKLEBUST, L.I. UND ONILLON, E.: Flexure pivot for aerospace mechanisms. In: Proceedings *10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, 24-26 September 2003, Spain, 2003

[HETZNER 2006]

HETZNER, H.: Simulation des Einflusses von Werkstück- und Tastelementgeometrie bei der taktilen Erfassung stark gekrümmter Oberflächen. *Studienarbeit QFM*, Universität Erlangen-Nürnberg, 2006

[HERTZ 1881]

HERTZ, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1881), S.156-171

[HIDAKA 2006]

HIDAKA, K.: Study of a small-sized ultrasonic probe. In: *Annals of the CIRP* 55/1 (2006), S. 567-570

[HIDAKA U.A. 2010]

HIDAKA, K., DANZEBRINK, H.-U., ILLERS, H., SAITO, A. UND ISHIKAWA, N.: A high-resolution, self-sensing and self-actuated probe for micro- and nano-coordinate metrology and scanning force microscopy. In: *Annals of the CIRP* 59/1 (2010), S. 517-520

[HOFFMANN U. WECKENMANN 2005]

HOFFMANN, J.; WECKENMANN, A.: Traceable Profilometry with a 3D nanopositioning unit and sensors with negligible measuring ranges in compensation method. In: *Journal of Physics: Conference Series* 13 (2005), S. 228-231

[HOFFMANN 2009]

HOFFMANN, J.: Elektrische Werkstückantastung für Nanometer aufgelöste Oberflächen- und Koordinatenmesstechnik. In: *Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik* 2009/18 (2009), Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation

[HOFFMANN U.A. 2009A]

HOFFMANN, J., WECKENMANN, A. UND SCHULER, A.: Mikrokoordinatenmesstechnik mit elektrischer Werkstückantastung. In: *Technisches Messen* 76/2 (2009), S. 91 - 97

[HOFFMANN U.A. 2009B]

HOFFMANN, J.; SCHULER, A. UND WECKENMANN, A.: Construction and evaluation of a traceable metrological scanning tunnelling microscope. In: *Measurement* 42/9 (2009), S. 1324- 1329

[HOFFMANN U.A. 2011]

HOFFMANN, J.; SCHULER, A.: Nanometer resolving coordinate metrology using electrical probing. In: *Technisches Messen* 78/3 (2011), S. 142 – 149

[HORNEGGER U.A. 2011]

HORNEGGER, J., PAULUS, D. UND KOWARSCHIK, M.: Diagnostic Medical Image Processing, Rigid Image Registration. *Vorlesungsunterlagen Diagnostic Medical Image Processing*, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Mustererkennung, 2011

[HUA U.A. 2010]

HUA, Y., COGGINS, C. UND PARK, S.: Advanced 3D metrology Atomic Force Microscope. In: *Proceedings ASMC 2010*, S. 7-10

[HUNG U.A. 2012]

HUNG, K.-Y., CHEN, Y.-K., HUANG, S.-H. UND SHYE, D.-C.: Molding and hot forming techniques for fabricating plastic aspheric lenses with high blue-light transmittance. In: *Microsyst Technol* 16 (2010), S. 1439–1444

[IBS 2012]
IBS PRECISION ENGINEERING: Datenblatt Triskelion. www.ibspe.com, aufgerufen 25.11.2012

[IFAM 2011]
FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MANUFACTURING TECHNOLOGY AND ADVANCED MATERIALS IFAM: Pro-environmental and economically airborne, Presseinformation, Holzkirchen, 30.03.2011

[JÄGER U.A. 2009]
JÄGER, G., MANSKE, E., HAUSOTTE, T. UND BÜCHNER, H.-J.: Metrologische Grundlagen und Wirkungsweise der Nanopositionier- und Messmaschine NMM-1. In: *Technisches Messen* 76/5 (2009), S. 227-234

[JIANG U. WHITEHOUSE 2012]
JIANG, X. UND WHITEHOUSE, D.J.: Technological shifts in surface metrology. In: *Annals of the CIRP* 61/2 (2012), S. 815-836

[JUSKO U. NEUGEBAUER 2007]
JUSKO, O. UND NEUGEBAUER, M.: Grundlagen der Rückführung von Koordinatenmessgeräten. In: PTB Mitteilungen 2007/4, S. 354-362

[KEITHLEY 2004]
KEITHLEY INSTRUMENTS. *Low Level Measurements Handbook*. Keithley Instruments, Inc., Ohio, 2004

[KELLER 1991]
KELLER, D.: Reconstruction of STM and AFM images distorted by finite-sized tips. In: *Surface Science* 253 (1991), S. 353-364

[KRÄMER 2007]
KRÄMER, P: Untersuchung der Tunnelmikroskopie als Antastwechselwirkung für die dimensionelle Nanomesstechnik, *Diplomarbeit QFM*, Universität Erlangen-Nürnberg, 2007

[KRYSTEK 2009]
KRYSTEK, M.: ISO Filters for Precision Engineering. In: *Technisches Messen* 76/2 (2009), S. 133-159

[KÜNG U.A. 2007]
KÜNG, A., MELI, F. UND THALMANN, R.: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. In: *Meas. Sci. Technol.*18 (2007), S.319-327

[LEBRASSEAUR U.A. 2001]
LEBRASSEAUR, E., BOUROUINA, T., POURCIEL, J-B., OZAKI, M., MASUZAWA, T. UND FUJITA, H.: Resonant-Type Micro-Probe for Vertical Profiler. In: *SEISAN KENKYU* 53/2 (2001), S. 35-38

[LEBRASSEUR U.A .2002]
LEBRASSEUR, E., POURCIEL, J.-B., BOUROUINA, T., MASUZAWA, T. UND FUJITA, H.: A new characterization tool for vertical profile measurement of high-aspect-ratio microstructures. In: *IOP Journal of Micromechanics and Microengineering* 12 (2002), S.280-285

[LENK 1996]
LENK, J.D.: *Simplified design of IC amplifiers*, Verlag Newes, 1996

[LEONE U.A. 1961]
LEONE, F. C., NELSON, L. S. AND NOTTINGHAM, R. B.: The Folded Normal Distribution. In: *Technometrics* 3/4 (1961), S. 543-550

[LIN U.A. 2007]
LIN, T.-H., YANG, H. UND CHAO, C.-K.: Concave microlens array mold fabrication in photoresist using UV proximity printing. In: *Microsyst Technol* 13 (2007), S. 1537–1543

[LIPSON U.A. 1997]
LIPSON, S.G., LIPSON, H.S. UND TANNHAUSER, D.S.: *Optik*, Springer Verlag, Berlin, 1997

[LMP7721]
TEXAS INSTRUMENTS: LMP7721 3 Femtoampere Input Bias Current Precision Amplifier, http://www.ti.com/product/LMP7721, aufgerufen 25.11.2012

[LONARDO U.A. 1996]
LONARDO P.M., TRUMPOLD, H., DE CHIFFRE, L.: Progress in 3D Surface Microtopography Characterization. In: *Annals of the CIRP* 45/2 (1996), S. 589-598

[LP2950]
National Semiconductor: LP2950 - Series of Adjustable Micropower Voltage Regulators. http://www.national.com/mpf/LP/LP2950.html, aufgerufen 09/2008

[LSGE 2012]
EUROMETROS: NPL LSGE: Least Squares Geometric Elements, http://www.eurometros.org/metros/packages/lsge/, aufgerufen 25.11.2012

[LT1635]
LINEAR TECHNOLOGY: LT1635 - Micropower Rail-to-Rail Op Amp and Reference, http://www.linear.com/product/LT1635, aufgerufen 25.11.2012

[LU U. KHONSARI 2007]
LU, X. UND KHONSARI, M.: An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings. In: *Tribology Letters* 27 (2007), S.169-176

[MACHLEIDT U. FRANKE 2004]
MACHLEIDT T. UND FRANKE K. H.: Reconstruction of measurements with scanning force microscopes with special image processing algorithms. In: *Proc. of XI. Int. Colloquium, Chemnitz, Germany* 1 (2004), S. 268-273

[MANSKE U.A. 2008]
MANSKE, E., BAITINGER, H., MASTYLO, R., DOROZHOVETS, N., SINZINGER, S. UND JÄGER, G.: Investigations for the improvement of optical edge detection with a laser focus probe. In: *Proceedings ICPM* 2008, International Conference on Precision Measurement (08. – 12.09.2008, Ilmenau, Deutschland), S. 7-8 und CD-ROM. – Tagungsband

[MARINELLO U.A. 2007]
MARINELLO, F., BARIANI, P., PASQUINI, A., DE CHIFFRE, L., BOSSARD, M. UND PICOTTO G.B.: Increase of maximum detectable slope with optical profilers, through controlled tilting and image processing. In: *Meas. Sci. Technol.* 18/2 (2007), S.384-389

[MARTIN U. WICKRAMASINGHE 1994]
MARTIN, Y. UND WICKRAMASINGHE, H.K.: Method for imaging sidewalls by atomic force microscopy. In: *Appl. Phys. Lett.* 64/19 (1994), S. 2498-2500

[MASUZAWA U.A. 1993]
MASUZAWA, T., HAMASAKI, Y. UND FUJINO, T.: Vibroscanning method for nondestructive measurement of small holes. In: *Annals of the CIRP* 42/1 (1993), S. 589-592

[MELI U. KÜNG 2007]
MELI, F., KÜNG, A.: AFM investigation on surface damage caused by mechanical probing with small ruby spheres. In: MST 18 (2007), S.496-502

[MESSZENTRUM QFM 2012]
MESSZENTRUM QFM, Ausstattung – Messraum. www.messzentrum.de/ausstattung/messraum , aufgerufen am 02.12.2012

[MURALIKRISHNAN U.A. 2005]
MURALIKRISHNAN, B., STONE, J.A. UND STOUP, J.R.: Fiber deflection probe for small hole metrology. In: *Precision Engineering* 30 (2005), S. 154-164

[NEUSCHAEFER-RUBE U. WISSMANN 2007]
NEUSCHAEFER-RUBE, U., WISSMANN, M.: Taktil-optischer 3D-Mikrotaster – Anordnungen und Messmethoden. In: *PTB - Mitteilungen* 117/4 (2007), S. 390-396

[OH U. ESCUTI 2007]
OH, C. UND ESCUTI, M. J.: Numerical analysis of polarization gratings using the finite-difference time-domain method. In: *Physical Review A* 76/4 (2007), art. Id. 043815

[OPA129]
TEXAS INSTRUMENTS: Ultra-Low Bias Current DiFet Operational Amplifier, http://www.ti.com/product/opa129, aufgerufen am 25.11.2012

[OPA132]
TEXAS INSTRUMENTS: OPA132: High Speed FET-Input Operational Amplifiers, http://www.ti.com/product/opa132, aufgerufen am 25.11.2012

[PEGGS U.A. 1999]
PEGGS, G.N., LEWIS, A.J., OLDFIELD, S.: Design for a compact high-accuracy CMM In*: Annals of the CIRP* 48/1 (1999), S. 417-420

[PETZ U.A. 2012]
PETZ, M., TUTSCH, R., CHRISTOPH, R., ANDRAES, M. UND HOPP, B.: Tactile–optical probes for three-dimensional microparts. In: *Measurement* 45 (2012), S. 2288-2298

[PRANTL U.A. 2011]
PRANTL, M., DANZL, R. UND HELMLI, F.: 3D Messung von Mikroschneidwerkzeugen. In: *VDI-Berichte* 2133 (2011), S. 83-92

[PTB 2006]
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, PTB news, Kleine Welt: Mikro-Prüfkörper, http://www.ptb.de/cms/publikationen/zeitschriften/ptb-news/news06-2/kleine-welt-mikro-pruefkoerper.html, aufgerufen 24.11.2012

[PTB 2012]
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT: Tastschnittverfahren, http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt5/fb-51/ag-515/tastschnittverfahren0.html, aufgerufen am 21.08.2012

[RENISHAW 2011]
RENISHAW, Broschüre “Leistungsstarke 5-Achsen-Messung“, www.renishaw.de, aufgerufen 7.11.2012

[RIEL U. BOS 2011]
VAN RIEL, M.C.J.M., BOS UND E.J.C.: 3D vibrating probe for measuring microfeatures with nanometer uncertainty. In: *56th international scientific colloquium*, 12.-16.9.2011, Ilmenau

[RUJIL 2001]
RUIJL, T.A.M.: *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine - Design, Calibration and Error Compensation*, PhD thesis, Ponsen & Looijen, Wageningen, 2001, ISBN 90-6464287-7

[RUBERT U. FRENZEL 2004]
RUBERT, P. UND FRENZEL, C.: The use of standard specimens to check stylus tip size in surface measuring instruments. In: *11th International Colloquium on Surfaces* 2, 2.-3.2.2004, S. 129-138

[SCHEIDING U.A. 2009]
SCHEIDING, S., GEBHARDT, A., EBERHARDT, R. UND TÜNNERMANN, A.: Micro Lens Array Milling on Large Wafers. In: *Optik & Photonik* 4 (2009), S. 41-45

[SCHRADER U.A. 2010]
SCHRADER, C., HERBST, C., TUTSCH, R., BÜTTGENBACH, S. UND KRAH, T.: Micro coordinate measuring machine for Parallel measurement of microstructures. In: *Key Engineering Materials* 437 (2010), S.136-140

[SCHRADER U.A. 2011]
SCHRADER, C., KRAH, T., TUTSCH, R. UND BÜTTGENBACH, S.: Parallelisierte taktile Messtechnik für Mikrostrukturen. In: *Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen*, Abschlussbericht DFG Schwerpunktprogramm StraMNano (2011), Shaker Verlag, Aachen, S. 19-35

[SCHRADER U. TUTSCH 2012]
SCHRADER, C. UND TUTSCH, R.: Calibration of a microprobe array. In: *Meas. Sci. Technol.* 23, 2012, doi:10.1088/0957-0233/23/5/054001

[SCHREVE 2010]
SCHREVE, K.: Limitations of a Selection of Micrometrology Techniques. In: *Proceedings International Conference on Competitive Manufacturing 2010*, S. 269-275

[SCHULER U.A. 2012A]
SCHULER, A., WECKENMANN, A. UND HAUSOTTE, T.: A setup for dynamic sensor rotation for high aspect ratio microstructure measurements. In: *10th international scientific conference “Coordinate Measuring Technique”*, 23.-25.4.2012, Bielsko-Biala, Polen

[SCHULER U.A. 2012B]
SCHULER, A., WECKENMANN, A. UND HAUSOTTE, T.: Enhanced measurement of high aspect ratio surfaces by applied sensor tilting. In: *Proceedings of the 20th IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”*, 09. 14.09.2012, Busan, Südkorea

[SCHULZ 2005]
SCHULZ, D.: Rasterkraftmikroskope vom Typ Veritekt. PTB Braunschweig, http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt5/fb-52/ag-525/rastersonden525/rasterkraftmikroskope.html, aufgerufen 02.12.2012

[SCHWENKE U.A. 2001]
SCHWENKE, H.; WAELDELE, F., WEISKIRCH, C. UND KUNZMANN, H.: Opto-Tactile Sensor for 2D and 3D Measurement of Small Structures on Coordinate Measuring Machines. In: *Annals of the CIRP* 50/1 (2001), S.361-364

[SEEWIG 2009]
SEEWIG, J.: *Optisches Messen technischer Oberflächen - Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2009

[SMARACT 2011]
SMARACT GMBH: Product catalogue, Produktkatalog, 2011, Volume 9

[SPAAN U. WIDDERSHOVEN 2011]
SPAAN, H. UND WIDDERSHOVEN, I.: Isara 400 Ultra-precision CMM. In: *VDI-Berichte* 2133 (2011), S. 41-50

[SPANOUDAKIS U. HENEIN 2004]
SPANOUDAKIS, P. UND HENEIN, S.: Qualification of Flexure Pivot for Aerospace Mechanisms, http://csnej106.csem.ch/detailed/pdf/e_211_HAFHA_CSEM_2004_Presentation.pdf, CSEM, Präsentation, aufgerufen am 02.12.2012

[STOUT 1993]
STOUT, K. J.: *Three-dimensional surface topography; measurement, interpretation and application*. Penton Press, London, (1993), ISBN 1-8571-8004-6

[SUSS 2011]
SUSS MicroOptics: Microlens arrays – catalog 2011, version 2011-1.2. http://www.suss-microoptics.com/downloads/SMO_catalog.pdf, aufgerufen 03.03.2012

[TANIGUCHI 1983]
TANIGUCHI, N.: Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. In: *Annals of the CIRP* 32/2 (1983), S.573-582

[TAYLOR HOBSON 2012]
TAYLOR HOBSON: Form Talysurf PGI, Datenblatt. http://www.taylor-hobson.com/ultra-precision-pgi-range.html, aufgerufen 02.12.2012

[TIBREWALA U.A. 2009]
TIBREWALA, A., HOFMANN, N., PHATARALAOHA, A., JÄGER, G. UND BÜTTGENBACH, S.: Development of 3D force sensors for nanopositioning and nanomeasuring machine. In: *Sensors* 9/5 (2009), S. 3228-3239

[TIETZE U. SCHENK 2002]
TIETZE,U. UND SCHENK, CH.: *Halbleiterschaltungstechnik*, Springer Verlag, Heidelberg, 2002

[TUTSCH U.A. 2010]
TUTSCH, R., PETZ, M., ANDRÄS, M., WIEDENHÖFER, T., NEUSCHAEFER-RUBE, U. UND WISSMANN, M.: Three-Dimensional Tactile-Optical Probing for the Measurement of Microparts. In: *Technisches Messen* 77/2 (2010), S. 95-100

[UKRAINTSEV U.A. 2012]
Ukraintsev, V.A., Orji, N. G., Vorburger, T. V., Dixson, R.G., Fu, J. und Silver, R.M.: On CD-AFM bias related to probe bending, In: Proc. of SPIE Vol. 8324/1 (2012), id 83240V

[VAN BRUSSEL U.A. 2000]
VAN BRUSSEL, H., PEIRS, J., REYNAERTS, D., DELCHAMBRE, A., REINHART, G., ROTH, N., WECK UND M., ZUSSMAN, E.: Assembly of Microsystems. In: *Annals of the CIRP* 49/2 (2000), S. 451-472

[VERMEULEN U.A. 1998]
VERMEULEN, M.M.P.A., ROSIELLE, P.C.J.N. UND SCHELLEKENS, P.H.J.: Design of a high-precision 3D-coordinate measuring machine. In: *Annals of the CIRP* 47/1 (1998), S. 447-450

[VDI/VDE 2617 BLATT 4 2006]
Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 4 2006: *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-3 für Koordinatenmessgeräte mit zusätzlichen Drehachsen*

[VDI/VDE 2617 BLATT 5 2010]
Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 5 2012: *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Überwachung durch Prüfkörper*

[VDI/VDE 2617 BLATT 12.1 2011]
Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 12.1 2011: *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Annahme- und Bestätigungsprüfungen für Koordinatenmessgeräte zum taktilen Messen von Mikrogeometrien*

[VIM 2012]
VIM: Internationales Wörterbuch der Metrologie, Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) - Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, Beuth Verlag, Berlin, 2012

[VÖLKEL U.A. 2003]
VÖLKEL, R., EISNER, M. UND WEIBLE, K.J.: Miniaturized imaging systems. In: *Microelectronic Engineering* 67-68 (2003), S. 461–472

[WECK U. BRECHER 2006]
WECK, M., BRECHER, C.: *Werkzeugmaschinen 5, Messtechnische Untersuchung und Beurteilung. Dynamische Stabilität*. Springer Verlag, Heidelberg, 2006

[WECKENMANN U. NALBANTIC 2003]
WECKENMANN, A., NALBANTIC, K.: Precision Measurement of Cutting Tools with two Matched Optical 3D-Sensors. In: *Annals of the CIRP* 52/1 (2003), S. 443-446

[WECKENMANN U.A. 2004]
WECKENMANN, A., ESTLER, T., PEGGS, G. UND MCMURTRY, D.: Probing systems in dimensional metrology. In: *Annals of the CIRP* 53/2 (2004), S. 657-684

[WECKENMANN U. WIEDENHÖFER 2004]
WECKENMANN, A. UND WIEDENHÖFER, TH.: Scanning Probe Microscopy and Surface Metrology. In: *11th International Colloquium on Surfaces* 2, 2.-3.2.2004, S.19-30

[WECKENMANN U.A. 2008A]
WECKENMANN, A.; HOFFMANN, J.; SCHULER. A.: Development of a tunnelling current sensor for a long - range nano- positioning device. In: *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008), ID 064002

[WECKENMANN U.A. 2008B]
WECKENMANN, A., HEIDEMANN, L., TAN, Ö. UND WIEDENHÖFER, TH.: Multisensor metrology for nanostructures technical surfaces. In: *12th International Colloquium on Surfaces*, 28.-29.1.2008, S. 218,-226

[WECKENMANN U.A. 2009A]
WECKENMANN, A., BÜTTGENBACH, S., TAN, Ö., HOFFMANN, J. UND SCHULER, A.: Sensors for accurate geometric measurements in manufacturing. In: *Proceedings Sensor*, 2009/2 (2009), S. 133–138

[WECKENMANN U.A. 2009B]
WECKENMANN, A., JIANG, X., SOMMER, K.-D., NEUSCHAEFER-RUBE, U., SEEWIG, J., SHAW, L. UND ESTLER, T.: Multisensor data fusion in dimensional metrology. In: *Annals of the CIRP* 58/2 (2009), S. 701-721

[WECKENMANN U.A. 2011]
WECKENMANN, A., TAN, Ö. UND HARTMANN, W.: Function Oriented Characterization For Surface Metrology. In: *International Journal of Nanomanufacturing* 7/5-6 (2011), S. 517-527

[WECKENMANN U. HARTMANN 2011]
WECKENMANN, A. UND HARTMANN, W.: Funktionsorientierte Bewertung mikrostrukturierter Oberflächen. In: *Proceedings Metrologie in der Mikro - und Nanotechnik, VDI Berichte* 2133 (2011), S. 207-216

[WECKENMANN U. SCHULER 2011]
WECKENMANN, A. UND SCHULER, A.: Application of modern high resolution tactile sensors for micro-objects. In: *Int. J. Precision Technology* 2/2/3 (2011), S. 266-288

[WECKENMANN 2012]
WECKENMANN, A.: *Koordinatenmesstechnik, Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen.* Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2012

[WECKENMANN U. SCHULER 2012]
WECKENMANN, A. UND SCHULER, A.: Application of sensor tilting for enhanced measurement of microstructures. In: *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 18.-19.04.2012, Huddersfield, England

[WECKENMANN U.A. 2012]
WECKENMANN, A., SCHULER, A. UND NGASSAM, R.J.B.: Enhanced measurement of steep surfaces by slope-adapted sensor tilting. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), doi:10.1088/0957-0233/23/7/074007

[WERTH 2012]
WERTH MESSTECHNIK. Datenblatt Werth Fiber Probe WFP 3D, Werth Messtechnik GmbH, Gießen, 2012

[ZANDMANN U.A. 2001]
ZANDMANN, F., SIMON, P. UND SZWARC, J.: *Resistor theory and technology*, SciTech Publ., London, 2001

[ZHANG U.A. 2012]
ZHANG, X., GAO, H., GUO, Y. UND ZHANG, G.: Machining of optical freeform prisms by rotating tools turning. In: *Annals of the CIRP* 61/2 (2012), S. 519–522